GRAVIDADE, BURACOS NEGROS E O UNIVERSO

Iain Nicolson

Francisco Alves

A gravidade é de longe a mais fraca das forças fundamentais conhecidas dos físicos e ainda assim o seu papel na modelagem do Universo que nos rodeia é notável. É a gravidade que nos mantém sobre a superfície da Terra, que encadeia a Lua em órbita ao redor de nosso planeta, a Terra em órbita ao redor do Sol e este em órbita ao redor do centro da galáxia. A gravidade domina o comportamento do Universo e governará sua futura evolução.

Este livro traça, em termos diretos, o desenvolvimento da mutável visão do homem a respeito desta misteriosa força, desde os elementos e a mecânica de Aristóteles, esclarecendo as idéias que levaram à teoria de Newton da gravitação universal e à eventual emergência da teoria da Relatividade Geral de Einstein, que permanece ainda hoje como a melhor teoria da gravitação que possuímos. Tendo explicado as implicações e efeitos da Relatividade, particularmente no que diz respeito à natureza da gravidade, Iain Nicolson examina o papel da gravidade no Universo e discute a extrema gravitação no contexto dos buracos negros, os mais enigmáticos dos objetos astrofísicos.

A existência dos buracos negros assinala a eventual morte do Universo? São os buracos negros as usinas de força situadas nos centros dos quasares e das galáxias ativas? Podem os miniburacos negros explodir? A gravidade varia com o tempo? Estas são apenas algumas das indagações discutidas neste livro importante, excitante e atual, um livro cujo tema principal se situa na fronteira do conhecimento, mas que pode ser de fundamental importância para nossa compreensão da natureza do Universo que nos rodeia.

GRAVIDADE, BURACOS NEGROS E O UNIVERSO

COLEÇÃO ASTRONOMIA E ASTRONÁUTICA

O Colapso do Universo
Isaac Asimov
Asimov Explica
Isaac Asimov
Saturno
Isaac Asimov
Tempo – O Profundo Mistério do Universo
John Gribbin
Até que o Sol se Apague
Robert Jastrow
O Fim do Mundo
Richard Morris
Astronomia e Astronáutica
Ronaldo Rogério de Freitas Mourão
Carta Celeste
Ronaldo Rogério de Freitas Mourão
Universo: As Inteligências Extraterrestres
Ronaldo Rogério de Freitas Mourão
Buraco Negro: O Supremo Desconhecível
John Taylor
Alpha Centauri
Isaac Asimov
Buracos Brancos
John Gribbin
Em Busca de Outros Mundos
Ronaldo Rogério de Freitas Mourão
Marte
Isaac Asimov
A Morte do Sol
John Gribbin
Júpiter
Isaac Asimov
Anuário de Astronomia
Ronaldo Rogério de Freitas Mourão

Iain Nicolson

GRAVIDADE, BURACOS NEGROS E O UNIVERSO

Tradução
SÉRGIO AUGUSTO TEIXEIRA

Francisco Alves

Título original: *Gravity, Black Holes and the Universe*

Revisão tipográfica: Umberto F. Pinto, Jorge A. Uranga e Salvador Pittaro

Impresso no Brasil
Printed in Brazil

CIP-Brasil. Catalogação-na-fonte
Sindicato Nacional dos Editores de Livros, RJ.

N558g

Nicolson, Iain.
Gravidade, buracos negros e o universo/Iain Nicolson; tradução de Sérgio Augusto Teixeira. – Rio de Janeiro: F. Alves, 1983.
(Coleção Astronomia e Astronáutica)

Tradução de: Gravity, black holes and the universe.
Bibliografia.

1. Cosmologia 2. Gravidade 3. Universo I. Título II. Série

CDD – 523.1
531.14
CDU – 523.1
531.5

83-0346

1983

LIVRARIA FRANCISCO ALVES EDITORA S/A
Rua Sete de Setembro, 177 – Centro
20050 – Rio de Janeiro – RJ

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações

DESENHOS

Fig.

FOTOS

Introdução

QUE É GRAVIDADE? Esta é uma pergunta que até o próprio Newton teve o cuidado de não tentar responder.

Todos nós estamos conscientes da presença da gravidade sobre a Terra; contudo, quando arrastamos nossos corpos pesados para fora da cama pela manhã, é difícil para nós nos darmos conta de que a gravitação é a mais fraca das quatro "forças fundamentais" que os físicos conhecem. Não obstante, embora possa ser fraca em escala microscópica, a gravidade é a força dominante quando se trata de grandes massas. É a gravidade que nos mantém sobre a superfície da Terra, que acorrenta a Lua em sua órbita ao redor da Terra, a Terra em sua órbita ao redor do Sol e o Sol em sua órbita ao redor do centro do nosso sistema estelar. A gravidade domina o comportamento do Universo como um todo e determinará sua futura evolução.

As outras três forças são a força eletromagnética que, tal como a gravitação, atua através de distâncias ilimitadas e as interações nucleares fortes e fracas, as quais são eficazes unicamente a pequenas distâncias. Trabalhos recentes demonstraram que a força eletromagnética e a força nuclear fraca parecem ser apenas manifestações diferentes de uma força subjacente e existem indicações promissoras de que a força nuclear forte logo possa ser colocada na mesma categoria. A gravitação, no momento, permanece de fora, já que a melhor teoria da gravitação disponível — A Teoria Geral da Relatividade de Einstein — a considera uma espécie de influência inteiramente diversa das outras forças, apesar dos esforços do próprio Einstein em seus últimos anos. Há esperanças de que a gravitação também venha a ser eventualmente unificada com as outras forças, mas existem dificuldades para isso. Enquanto o poder das outras é tal que suas propriedades podem ser comprovadas sem sombra

de dúvida através de experiências de laboratório, para distinguir entre as teorias rivais da gravidade, é preciso examinar grandes massas, campos gravitacionais intensamente concentrados e fenômenos em escala muito grande. Com efeito, precisamos utilizar um laboratório extremamente grande – o próprio Universo.

Se quisermos avaliar o papel que a gravitação tem de desempenhar no Universo, do ponto de vista global, é necessário ter uma idéia da escala do Universo e da natureza de seus principais componentes.

A matéria é constituída de átomos, cada elemento químico diferente possuindo átomos com características particulares. Na visualização mais simples, considera-se que os átomos possuam um núcleo central concentrado, constituído de partículas pesadas conhecidas como prótons, os quais possuem uma carga elétrica positiva, e os nêutrons, que não têm carga; ao redor do núcleo circulam numerosos elétrons, mais leves e possuidores de carga negativa. Os físicos nucleares, em suas investigações cada vez mais aprofundadas dos processos subatômicos e nucleares, descobriram que existe uma espantosa quantidade de outras "partículas" de várias espécies, muitas das quais possuidoras de vida extremamente curta; as partículas "fundamentais" como os prótons e os nêutrons são elas mesmas constituídas de partículas ainda mais básicas, chamadas quarks.

Os tipos de partículas pesadas (entre as quais o próton e o nêutron) são conhecidos como bárions, as partículas leves (tais como os elétrons) são conhecidas como léptons e um grupo de partículas de massa intermediária recebe o nome de mésons.

Os átomos e suas partículas constituintes representam os componentes básicos do Universo material, sendo seu comportamento em geral e suas interações mútuas governadas pelas forças da natureza.

Vivemos sobre a Terra, um planeta que viaja em torno do Sol percorrendo uma órbita elíptica. Nosso vizinho mais próximo é a Lua, o satélite natural da Terra, a qual viaja ao redor da mesma a uma distância média de 384.000 quilômetros, o que equivale aproximadamente a dez vezes a circunferência do equador terrestre.

O Sol é uma estrela típica. Um corpo gasoso possuidor de luz própria com um raio cerca de cem vezes maior que o da Terra e aproximadamente 330.000 vezes mais massa do que nosso planeta. Produz energia mediante reações nucleares que ocorrem em seu núcleo através de um processo no qual a matéria é convertida em energia de acordo com um princípio que emergiu da Teoria Especial da Relatividade de

Einstein (veja Capítulo 4). A distância média entre o Sol e a Terra é cerca de 150 milhões de quilômetros e esta distância define uma unidade de medida denominada unidade astronômica *(UA).*

Muitas vezes é conveniente, uma vez que a luz constitui a entidade que se move mais depressa no Universo, pensar nas distâncias em termos do tempo que levaria um raio de luz para atravessar essas distâncias. A velocidade da luz no espaço vazio é cerca de 300.000 km por segundo. Com esta velocidade um raio de luz precisa de 1,3 segundo para vir da Lua até a Terra e de 8,3 minutos para vir do Sol até o nosso planeta.

O Sol, juntamente com os nove planetas conhecidos, vários satélites planetários, outros corpos menores e certa quantidade de gases e poeiras – todos os quais viajam ao redor do Sol, sob sua influência gravitacional – constitui o Sistema Solar. Pela ordem de distância do Sol, os planetas são Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno e Plutão. Suas distâncias médias do Sol variam de 0,4 UA quanto a Mercúrio até pouco menos de 40 UA no que se refere a Plutão: um raio de luz partido do Sol necessita de cinco horas e meia para atingir Plutão. Mais além considera-se existir um halo de cometas, alguns dos quais fazem visitas aos limites internos do Sistema Solar.

A estrela mais próxima de nós, além do próprio Sol, é uma estrela vermelha pouco brilhante conhecida como Proxima Centauri. Encontra-se cerca de 250.000 vezes mais longe de nós do que o Sol. Um raio de luz leva pouco mais de 4,2 anos para vir desta estrela à Terra e isto nos leva a considerar outra unidade de medida para distâncias astronômicas, o ano-luz. *Um ano-luz é a distância percorrida por um raio de luz em um ano e equivale a 9,46 trilhões de quilômetros (que se escreve para maior conveniência como* $9{,}46 \times 10^{12}$ *km) ou cerca de 63,240 UA.*

O Sol é um membro de um vasto sistema estelar que contém cerca de 100 bilhões de estrelas, conhecido como nossa galáxia. Considera-se que a galáxia tenha cerca de 100 mil anos-luz de diâmetro (embora alguns resultados recentes sugerem que possa ser significativamente menor) e consiste de um núcleo central onde as estrelas se encontram concentradas de forma relativamente densa, circundadas por um disco achatado onde as estrelas se acham distribuídas mais esparsamente. O Sol está localizado no disco, a cerca de 30.000 anos-luz do centro da galáxia. O disco contém nuvens de gás e poeira fora das quais novas estrelas continuam a se formar, distribuindo-se as estrelas e as nuvens de gás em um padrão próximo da espiral em relação ao núcleo. Distribuídas ao

redor do corpo principal da galáxia acha-se um halo de velhas estrelas, muitas das quais concentradas em grupos estelares maciços conhecidos como aglomerações globulares.

Além das fronteiras do nosso sistema estelar podemos ver bilhões de outras galáxias, algumas de formato espiral, outras elípticas e ainda outras de aspecto bastante irregular. Nossa galáxia é um dos membros de uma pequena aglomeração de galáxias conhecida como o Grupo Local, o membro mais importante deste grupo sendo representado pela galáxia de Andrômeda, que se localiza a uma distância aproximada de 2.200.000 anos-luz, tratando-se, casualmente, do mais distante objeto que pode ser visto (sob condições ideais) a olho nu. Utilizando telescópios podemos observar galáxias a distâncias que ultrapassam 5 bilhões de anos-luz e existem outras entidades como as radiogaláxias (que emitem prodigiosas quantidades de ondas de rádio) e quasares (veja Capítulo 10) que podem ser detectados a distâncias possivelmente superiores a 15 bilhões de anos-luz. Tal é a escala do Universo até agora visualizado pelo homem.

Como veremos no Capítulo 11, os indícios indicam que o Universo está se expandindo e que provavelmente originou-se a partir de uma grande explosão que teve lugar, de acordo com as estimativas atuais, entre 10 e 20 bilhões de anos atrás. Seja lá o que for que possa ter ocorrido nesses momentos iniciais, a gravidade é a força que hoje controla a estrutura e o destino do Universo. Seja ou não o Universo limitado, continue a existir em um futuro infinito ou venha a ter um fim violento, ele é governado pela interação gravitacional entre todos os seus componentes.

Embora o grande painel do Cosmos proporcione a gigantesca arena na qual os efeitos da gravitação podem ser estudados e testados, existem regiões localizadas do espaço nas quais a gravidade pode superar todas as demais: são os buracos negros. Estes representam regiões de intensa gravitação formada, provavelmente, pelo colapso da matéria, como, por exemplo, o colapso de uma estrela de grande massa no final de sua vida.

Embora mesmo a luz não possa escapar dele, um buraco negro pode também exercer influência gravitacional sobre os seus arredores, uma influência que torna estas bizarras regiões detectáveis, pelo menos em princípio. A massa de novas informações astronômicas que se tornaram disponíveis, particularmente durante os últimos 15 anos, representa em grande parte o resultado de nossa habilidade de colocar instrumen-

tos acima da atmosfera e levou os astrônomos a acreditar que possam estar detectando os efeitos dos buracos negros em uma grande variedade de contextos astrofísicos que variam das estrelas binárias (pares de estrelas em órbita ao redor uma da outra) até galáxias e quasares.

Os avanços teóricos não podem surgir quando desprovidos de testes experimentais adequados. Após a Relatividade Geral, na primeira parte do século, ter passado com sucesso pelos poucos testes observacionais aos quais podia então ser sujeita, o interesse da pesquisa sobre o assunto desapareceu – a não ser no tocante a um punhado de fenômenos esotéricos, as idéias newtonianas sobre a gravitação eram perfeitamente adequadas para todos os cálculos gravitacionais, inclusive para os que foram necessários para enviar homens à Lua. Entretanto, o recente surgimento de dados astronômicos, relativos particularmente a corpos celestes que entraram em colapso, como os buracos negros, e relativos ao Universo como um todo mudaram incrivelmente esta situação. Por outro lado, o estudo da gravidade tornou-se uma ciência experimental, na qual testes mais sofisticados foram elaborados e realizados, achando-se em andamento a busca das ondas gravitacionais (veja Capítulo 12). Sob o aspecto teórico, a Relatividade Geral está sendo ela mesma mais profundamente explorada e ampliada, novas teorias acham-se sob exame e a possibilidade de unificar a gravidade com as outras forças está sendo investigada. Novas e excitantes possibilidades estão surgindo, resumidas pela sugestão do Professor Stephen Hawking de que os buracos negros, até agora encarados como imortais, possam eventualmente explodir! Parece que estamos colocados na crista de uma onda de grandes descobertas e avanços; é uma época excitante.

Neste livro procuramos, antes de mais nada, demonstrar como nossas idéias a respeito da força, do movimento e da gravidade se desenvolveram desde os tempos antigos até as triunfantes sínteses elaboradas por Newton e Einstein. Explorei de forma pormenorizada os aspectos teóricos e observacionais destas duas áreas de maior interesse contemporâneo nas quais a gravidade desempenha um papel significativo – os buracos negros, com suas muitas e bizarras propriedades, e a cosmologia, o estudo da estrutura e da evolução do Universo. Finalmente, tentei visualizar o presente e o futuro da Relatividade Geral e das teorias alternativas sobre a gravitação, procurando examinar questões tais como se a força da gravidade varia ou não com o tempo e em que extensão novos testes experimentais serão capazes de melhorar e alterar nossa compreensão desta força ilusória que tudo permeia.

PARTE UM
Perspectivas Mutáveis

I
Força e movimento no mundo antigo

O MUNDO deve ter sido um lugar assustador para o homem primitivo, cheio de fenômenos que escapavam de seu controle ou da sua compreensão. As grandes forças naturais do vento e da água – temporais, trovões, relâmpagos, terremotos e enchentes – pareciam estar sujeitas aos caprichos de seres sobrenaturais. Entretanto, havia também padrões regulares de acontecimentos que, à medida que as sociedades humanas se tornaram mais complexas, gradualmente vieram à tona. O ciclo mais óbvio era proporcionado pelo nascer e pelo pôr-do-sol diariamente, sendo o próprio Sol, o dispensador de luz e calor, divinizado nas culturas mais antigas. A Lua proporcionava luz à noite e seu ciclo de fases variáveis representou a base de outra unidade de medida de tempo, o mês. Ela também foi divinizada mas, em contraste com o Sol (o qual geralmente recebia características masculinas), à Lua foram atribuídas geralmente qualidades femininas.

O ciclo mais longo das estações teve importância vital, particularmente no que se refere ao desenvolvimento da agricultura. As estrelas eram constantes, inalteráveis em suas formações, ou constelações, mas o Sol e a Lua se moviam em relação às estrelas, assim como certo número de "estrelas errantes", os cinco planetas cuja existência já era conhecida desde tempos pré-históricos. A posição variável da Lua era facilmente visível de noite para noite e o fato de que o Sol se movia através das estrelas podia ser estabelecido mediante a observação de que diferentes estrelas eram visíveis perto do horizonte pouco antes do Sol nascer ou pouco depois do Sol se pôr em diferentes épocas do ano. Os movimentos dos planetas eram menos óbvios, mas não obstante bem evidentes para os primeiros observadores do céu. Havia um padrão regular e incessante de eventos no céu, o Sol, a Lua e os planetas se mo-

viam de acordo com ciclos repetitivos, enquanto as estrelas permaneciam imutavelmente em suas posições. Já sobre a Terra, as coisas eram diferentes. Ocorriam mudanças, não raro rápida e imprevisivelmente. Objetos pesados caíam, as chamas subiam, os líquidos se espalhavam e fluíam, enquanto o ar se movia ao redor de nós, invisível, mas tangivelmente. Quem ou que controlava estes movimentos? À medida que gerações de espíritos inquisidores ponderaram sobre estas indagações, a mente humana enveredou na direção do conhecimento e na compreensão do Universo, em busca das explicações naturais para os fenômenos – tentando encontrar a ordem do mundo, seus padrões e estruturas, assim como as forças fundamentais que governam o comportamento do Universo e de tudo que ele contém.

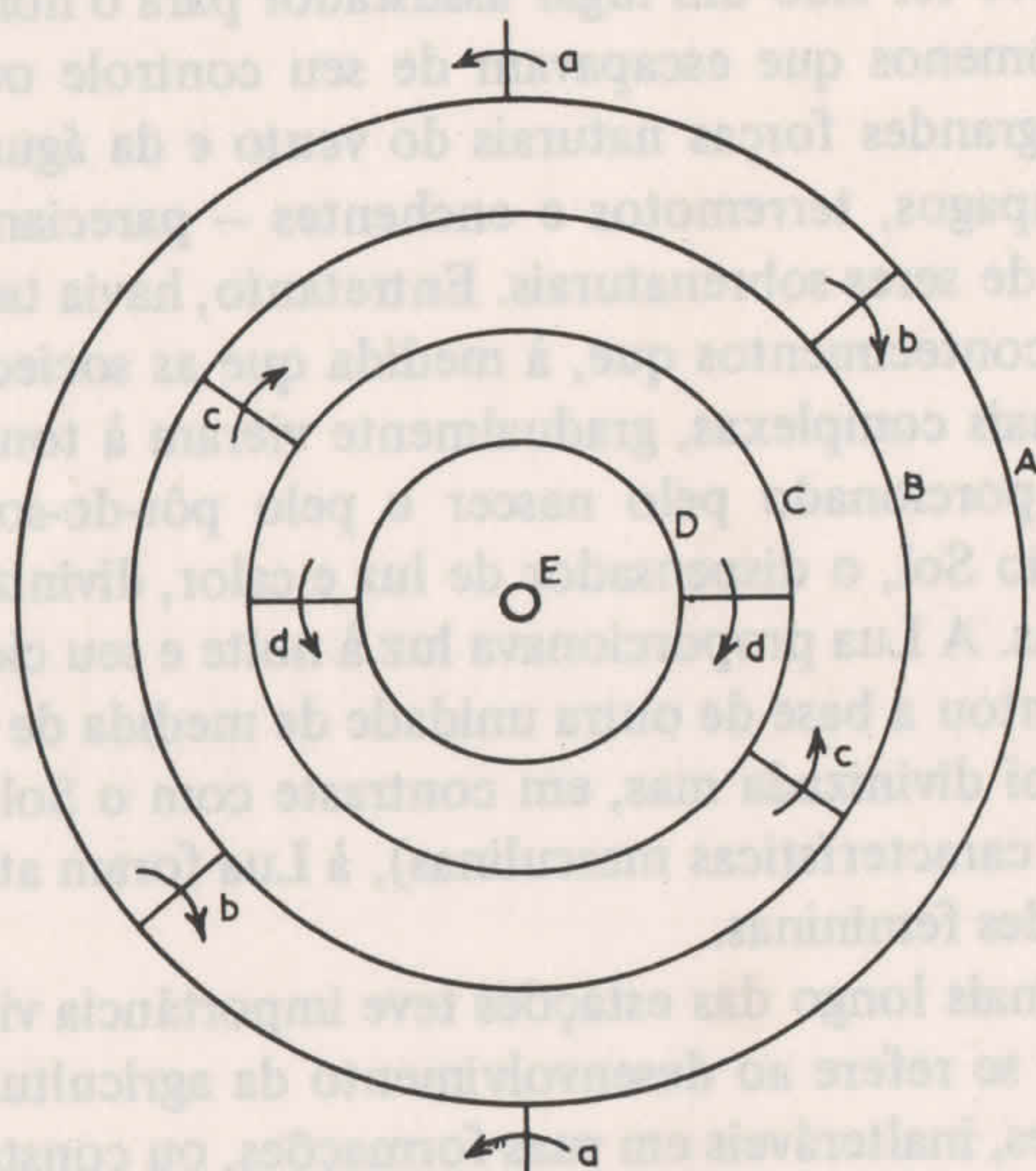



Fig. 1 As esferas planetárias de Eudoxos. *Para explicar o movimento de um planeta como Júpiter, Eudoxos precisou de quatro esferas giratórias. A esfera A girava em 24 horas para explicar o movimento diário do firmamento, enquanto a esfera B girava, em torno de um eixo inclinado em relação ao primeiro cerca de 23,5°, em direção anti-horária em um período de cerca de 12 anos, assim explicando o movimento de Júpiter em relação às estrelas. As esferas C e D revolviam em direções opostas durante um período de 13 meses para explicar as alças retrógradas traçadas pelo planeta com intervalos de 13 meses.*

Todas as antigas cosmologias colocaram a Terra no centro do Universo. A Terra era geralmente concebida como plana ou em forma lenticular, sendo o céu considerado como uma cúpula colocada acima dela. Havia divindades em profusão. De acordo com as idéias dos antigos egípcios, o céu era o corpo da deusa Nut, se mantinha sobre o Deus-Terra Qeb, enquanto o Sol nascia a cada manhã e navegava através do firmamento em uma barca. Entretanto, seguir-se-iam idéias mais complexas. A civilização jônica, que floresceu por volta de 700 a.C. às margens do Mar Egeu, desenvolveu a idéia de que a Terra se localizava no centro de um Universo esférico e mais tarde – talvez devido a um crescente senso de simetria – surgiu a noção de que a Terra mesma poderia ser uma esfera. A Terra esférica estaria no centro de um Cosmos esférico.

Os gregos foram grandes geômetras e possuíam um senso de simetria e perfeição geométrica bem desenvolvido. Assim como o círculo era a curva mais perfeita, uma vez que não tinha começo nem fim e cada ponto sobre ele era eqüidistante do centro, assim também a esfera constituía o sólido mais perfeito. Surgiu a idéia de que do perfeito e imutável firmamento só eram possíveis formas e movimentos perfeitos.

Como se moviam o Sol, a Lua, as estrelas e os planetas? Os pitagóricos tentaram demonstrar que seus movimentos eram circulares, mas de acordo com uma abordagem diferente, Eudoxos (cerca de 408-355 a.C.) elaborou um sistema de esferas concêntricas cujo centro era a Terra para explicar o comportamento dos corpos celestes. As estrelas estariam fixadas na esfera mais externa, que girava ao redor da Terra uma vez por dia, assim explicando sua elevação, seu movimento de leste para oeste e o fato de descambarem no horizonte. Três esferas mais eram necessárias para explicar os movimentos do Sol e da Lua, enquanto cada um dos planetas precisava de quatro esferas em movimento relativo para descrever seu comportamento. Consideremos Júpiter, por exemplo (Fig. 1). Ele compartilha o movimento diário do firmamento e a mais externa deste conjunto de esferas leva em conta este aspecto. Conduzida dentro desta esfera achava-se outra inclinada em relação ao eixo da primeira em um ângulo de 23 graus e que revolvia em pouco menos de 12 anos, assim explicando a lenta mudança de posição de Júpiter em relação às estrelas ao fundo.

As outras duas esferas eram necessárias para explicar um curioso aspecto do comportamento planetário de acordo com o qual os planetas, de tempos em tempos, param e invertem suas direções por um mo-

mento antes de assumir seu movimento normal de oeste para leste em relação às estrelas ao fundo. Em conseqüência deste comportamento os planetas Marte, Júpiter e Saturno pareciam traçar alças no céu a intervalos regulares, enquanto Mercúrio e Vênus também se moviam de forma bastante desconcertante. Ao todo, Eudoxos necessitava de um total de 27 esferas móveis.

Estas idéias foram encampadas por Aristóteles (384-322 a.C.), o mais influente dos grandes filósofos gregos. Ele ampliou a teoria a tal extensão que 55 esferas móveis foram necessárias para explicar todos os movimentos celestiais. Em seu sistema a Terra estava imóvel, era esférica e firmemente localizada no centro do Universo.

Aristóteles era um notável observador da natureza. Provou que a Terra era esférica através da forma curva que a sombra da Terra projetava sobre a Lua durante um eclipse lunar e diante do fato de que as estrelas podiam ser alteradas quando alguém se movia para o norte e para o sul. O desaparecimento dos navios no horizonte também foi explicado da mesma maneira. Fez notáveis contribuições para o desenvolvimento do pensamento em muitas e variadas direções – política, economia, ética e metafísica; além disso, pode ser denominado com justiça o fundador da biologia.

Os elementos e a mecânica de Aristóteles

A MECÂNICA aristotélica baseava-se firmemente no conceito de uma Terra fixa localizada no centro do Universo e suas opiniões tornaram-se os alicerces de dogmas filosóficos e religiosos que só seriam superados no século XVII. Sua mecânica adotou as idéias do *movimento natural* e do *lugar natural*. Segundo os pontos de vista expressados no século anterior por Empédocles (cerca de 484-424 a.C.), Aristóteles desenvolveu a idéia de que os corpos eram constituídos de quatro elementos básicos – ar, terra, fogo e água. A terra era absolutamente pesada e o fogo era absolutamente leve, enquanto o ar e a água eram intermediários sob este aspecto. O lugar natural da terra era no centro da Terra, que era o centro geométrico do Universo; por conseguinte, o movimento natural das substâncias terrestres era cair diretamente para o centro da Terra como ocorre com os objetos pesados. O movimento natural do fogo era subir para seu lugar natural no firmamento. O lugar natural da água era

acima da terra e o lugar natural do ar era acima da água mas abaixo do fogo. Não havia qualquer conceito referente a uma força de gravidade nestas idéias, mas o lugar natural dos corpos pesados era o centro do Universo, o qual também era o centro da Terra.

O movimento de uma seta ou de uma pedra arremessada no ar não era natural; era um movimento forçado ou "violento". Esta espécie de movimento só podia ter lugar quando uma *força* estava atuando para iniciar o movimento e manter o corpo em sua trajetória. Quando a força motivadora se esgotava, o corpo procurava seu lugar natural. Assim sendo, uma pedra atirada para cima continuaria a subir enquanto a força estivesse atuando; quando esta se esgotasse, ela cairia para a Terra ao longo de uma trajetória vertical, buscando seu lugar natural. De acordo com Aristóteles, todo movimento nas vizinhanças da Terra teria lugar ao longo de linhas retas. As absurdas conclusões a que esta doutrina conduziu podem ser bem ilustradas pelo caso do vôo de uma seta. Quando disparada para o alto em um ângulo com a horizontal, ela continuaria a mover-se nesta direção (em uma linha reta) enquanto a força do ar continuasse a impeli-la. Quando a força motivadora cessasse, a seta tombaria verticalmente em direção à Terra. Podemos convencer-nos facilmente, mediante o simples expediente de arremessar um seixo, de que a trajetória de um projétil descreve uma curva (uma parábola) ao invés de duas linhas retas sucessivas. Poderíamos pensar que a simples observação (que ele encorajava) teria demonstrado a inadequação da teoria do movimento de Aristóteles, mas tal foi o poder do seu sistema completo de filosofia natural que nenhuma opinião alternativa aceitável emergiu por mais de 1.000 anos. (Veja legenda da Fig. 9.)

O firmamento era separado e diferente da Terra. Sobre a Terra, os quatro elementos eram corruptíveis: as coisas começavam, floresciam e decaíam. No céu, porém, nada mudava; por isso os corpos celestes tinham de ser feitos de um quinto elemento, puro e incorruptível – o *éter*. O único corpo celeste que mostrava uma aparência variável era a Lua, com seu aspecto verrucoso e suas fases mutáveis. A doutrina aristotélica sugeriu que a esfera da Lua (isto é, a esfera na qual a Lua estava localizada enquanto girava ao redor da Terra) marcava o limite entre o firmamento incorruptível e o mundo básico e mutável da Terra. Além da esfera da Lua tudo era perfeição.

O círculo representava o movimento natural dos corpos celestiais perfeitos, enquanto tanto os movimentos naturais quanto violentos nas imediações da Terra ocorriam ao longo de linhas retas. É claro que a

própria Terra não podia se mover, fosse sobre seu próprio eixo ou ao redor do Sol, porque isto não seria o movimento natural da matéria terrestre. Ele refutou sugestões de que a Terra poderia girar sobre seu próprio eixo ponderando que quando um objeto pesado é atirado para cima retorna ao ponto de partida; da mesma forma um peso largado do alto de uma torre vai bater ao pé da torre. Se a Terra estivesse girando, a pedra ia cair bem longe do pé da torre (utilizando os valores atuais para a velocidade da queda e o tamanho da Terra, se o argumento de Aristóteles estivesse correto, uma pedra que caísse de uma torre de 80 metros de altura iria bater cerca de 2 quilômetros a oeste da torre!). Pela mesma razão, haveria uma terrível ventania varrendo a superfície da Terra se ela estivesse girando desta forma patentemente antinatural.

Aristóteles também argumentou contra o movimento ao redor do Sol baseando-se no fato de que se a Terra se movesse desta maneira, estaria mais próxima de diferentes partes da esfera das estrelas em momentos diferentes (Fig. 2) e as posições aparentes das estrelas mudariam; duas estrelas, por exemplo, seriam vistas afastando-se uma da

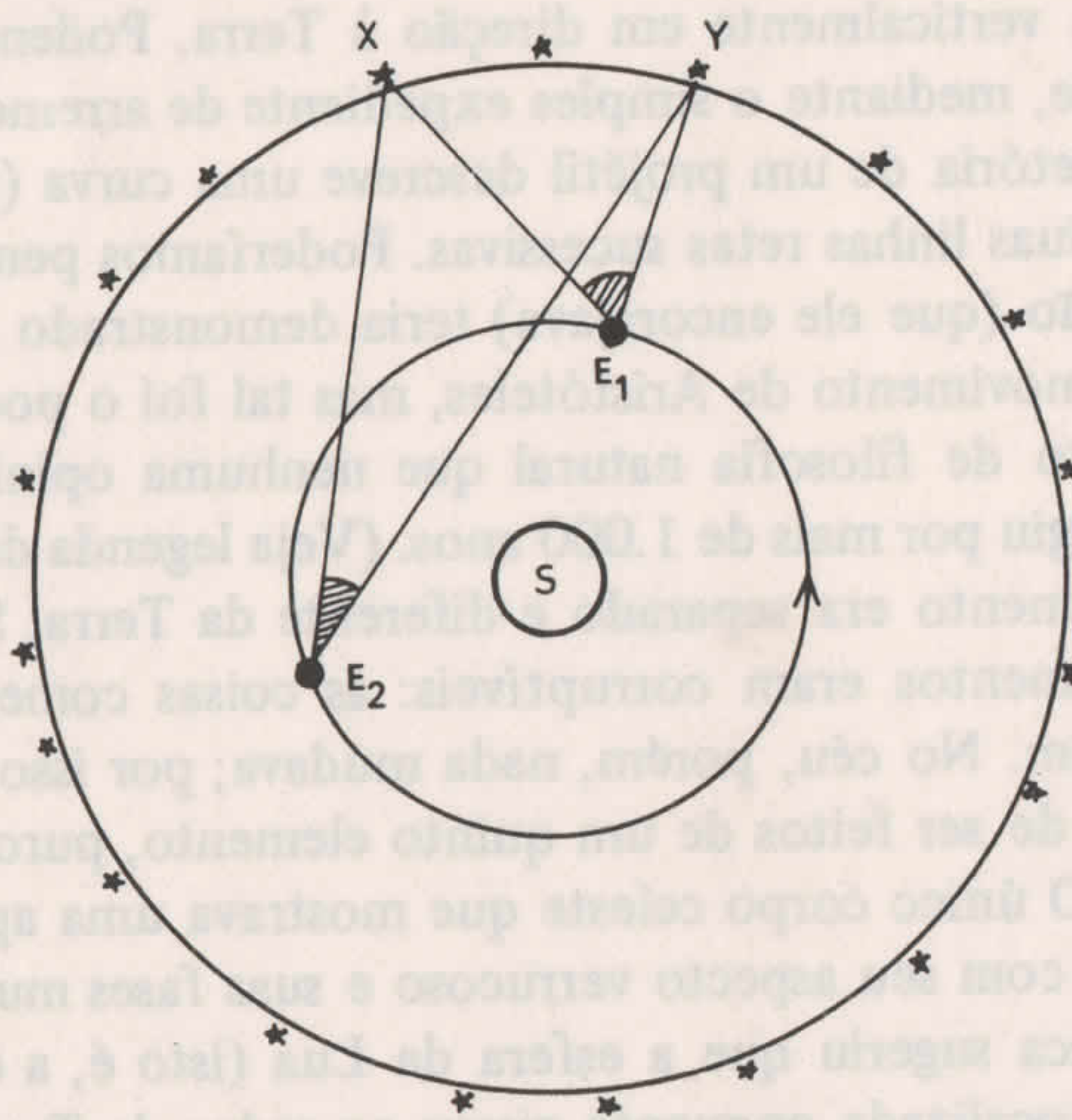



Fig. 2 Refutação do movimento da Terra. *Um argumento usado pelos gregos contra a possibilidade de que a Terra podia se mover era que, se ela o fizesse, e então se movesse, digamos, de E_1 para E_2, o ângulo entre as estrelas X e Y mudaria notavelmente. Como isto não era observado, a Terra não podia se mover.*

outra à medida que a Terra se aproximasse delas e aproximando-se uma da outra à medida que a Terra se afastasse. Como este efeito de paralaxe não era observado, a Terra não podia mover-se. De fato, esta espécie de alteração de posição ocorre mas só pode ser detectada mediante observações telescópicas cuidadosas e precisas, simplesmente porque as estrelas estão muito afastadas – muito mais do que se pensava na época de Aristóteles.

Todo movimento exigia uma força ativa. O movimento natural próximo da Terra devia-se às qualidades inerentes ao peso ("gravidade") ou à leveza ("levidade"), que faziam os corpos mover-se para cima ou para baixo. O movimento circular natural das esferas celestiais era atribuído a um divino primeiro movedor.

Embora fosse fácil ver a conexão entre força e movimento no que se referia a erguer, puxar ou empurrar, o movimento forçado dos corpos através do ar trazia problemas. Se um cavalo estivesse puxando uma carroça, o movimento só teria lugar enquanto o cavalo continuasse a puxar; se o cavalo parasse, a carroça também pararia. Diante do movimento de uma seta disparada de um arco, como a força era comunicada à seta? Aristóteles concluiu que ela devia ser transmitida através de sucessivas camadas de ar do arco até a seta. Uma sugestão anterior, devida a Platão, foi de que o ar adiante da seta se abria, movendo-se para trás dela e impelindo-a.

O meio através do qual a seta estava viajando transmitia a força, mas também resistia ao movimento. Para o movimento ocorrer, a força tinha de vencer a resistência; o movimento uniforme exigia um equilíbrio adequado entre os dois fatores opostos. A velocidade de um corpo em movimento era diretamente proporcional à força (quanto maior a força, mais rápido o movimento) e inversamente proporcional à resistência (quanto maior a resistência, mais lento o movimento). O conceito de resistência era importante na mecânica aristotélica.

Seguindo esta linha de argumentação, Aristóteles afirmou ter demonstrado a impossibilidade do vácuo. Se um corpo atinge uma determinada velocidade mediante uma determinada força em um meio denso, atingirá maior velocidade em um meio menos denso. No vácuo, não haveria qualquer resistência; uma vez que a velocidade é inversamente proporcional à resistência, a velocidade dos corpos no espaço vazio se tornaria infinita. Uma vez que tal conclusão era claramente absurda, não podia existir um espaço realmente vazio; em vez disso, todo o espaço devia estar cheio de uma espécie de meio. O conceito de

um éter onipresente desafiou o pensamento científico até o século XX.

Na opinião de Aristóteles, corpos do mesmo tamanho, forma e peso deveriam cair com a mesma velocidade desde que a força ("gravidade") e a resistência sobre eles fossem as mesmas. Entretanto, se dois corpos do mesmo tamanho e do mesmo formato, mas com pesos diferentes, fossem largados de certa altura, o mais pesado deveria mover-se mais depressa e atingir o solo primeiro porque, embora a resistência sobre ambos fosse a mesma, a força (peso) seria maior no caso do objeto mais pesado. A aceleração dos corpos em queda livre era responsável pelo peso de um corpo ir aumentando à medida que ele se aproximava mais do seu lugar natural.

Era, portanto, uma clara conclusão da mecânica aristotélica de que – desde que se tratassem de corpos de dimensões similares – *que quanto mais pesado o corpo, mais depressa cairia*. Esta foi uma opinião que persistiu até a revolução científica quase dois milênios mais tarde e mesmo hoje ainda é comum a crença de que os corpos mais pesados caiam mais depressa do que os leves – parece bastante razoável.

O desenvolvimento da teoria planetária

HOUVE AQUELES que se opuseram à idéia de um Universo geocêntrico. Filolaus, um pitagórico que viveu na última metade do século V a.C., sugeriu que a Terra viajava diariamente ao redor de um fogo central (não o Sol), por razões relacionadas com a obsessão pitagórica com os números. Heracleides (cerca de 390-310 a.C.) propôs um esquema segundo o qual Mercúrio e Vênus viajavam ao redor do Sol, enquanto o Sol e outros planetas se moviam ao redor da Terra. Aristarco (cerca de 310-230 a.C.) foi mais longe ao sugerir que todos os planetas, inclusive a Terra, viajavam ao redor do Sol; entretanto, esta idéia já surgira bem antes do seu tempo e fora rejeitada por numerosas razões, inclusive pela sua incompatibilidade com a mecânica aristotélica (o lugar natural dos corpos pesados só podia ser o centro da Terra) e a ausência de qualquer efeito de paralaxe.

Ptolomeu (cerca de 100-165 a.D.) argumentou que, uma vez que o centro do Universo é o lar natural do material terrestre, só podia ser a Terra. Se assim não fosse, sendo mais pesado do que qualquer um dos objetos sobre sua superfície, estaria caindo em direção ao centro do Cosmos muito mais depressa do que qualquer outra coisa, deixando os

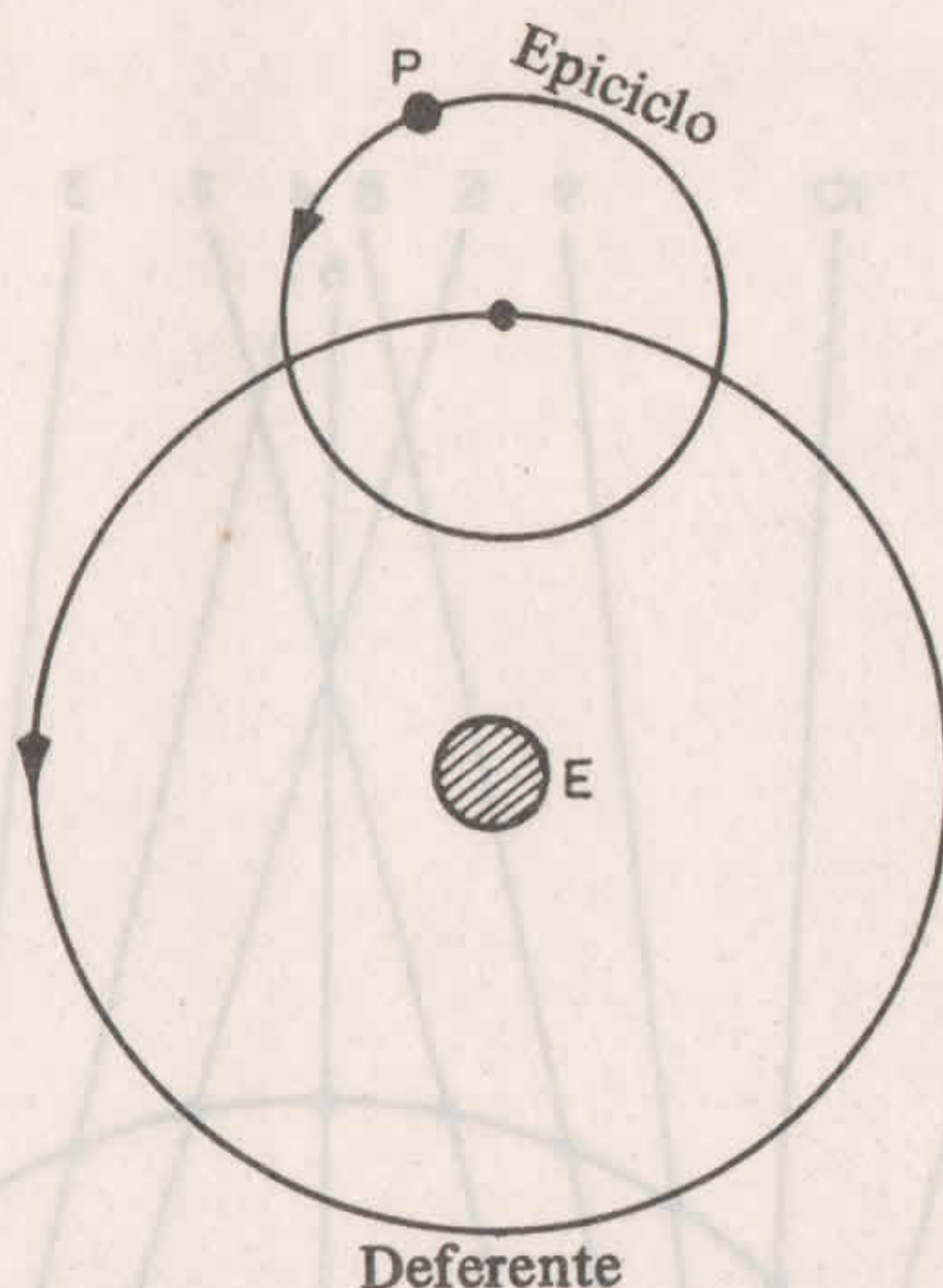



Fig. 3 Epiciclo e deferente. *Este é um dentre os muitos artifícios usados no sistema ptolemaico. O planeta P supostamente movia-se em um pequeno círculo, o epiciclo, enquanto o centro desse círculo se movia ao redor da Terra em um círculo maior, o deferente.*

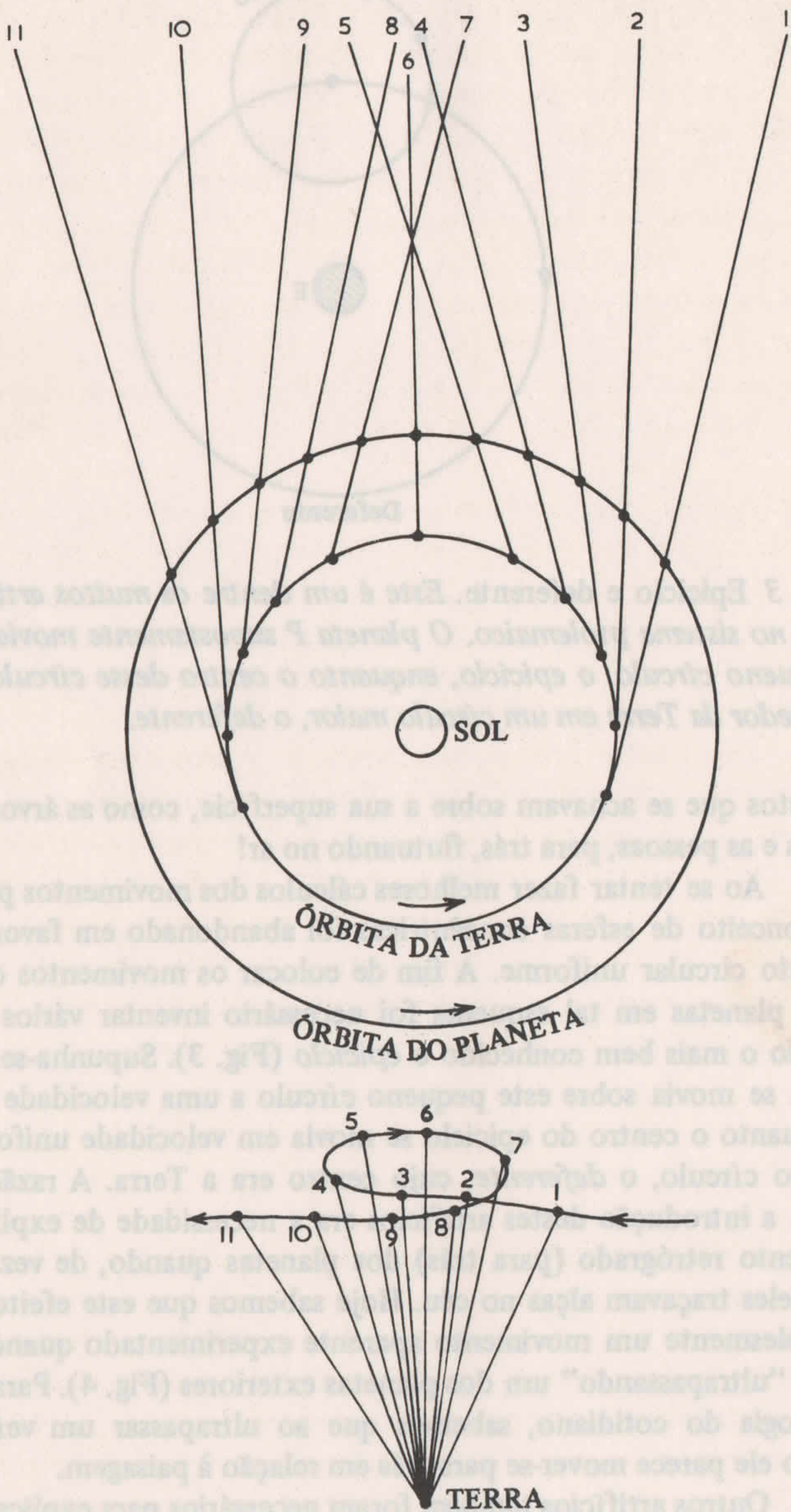
objetos que se achavam sobre a sua superfície, como as árvores, os animais e as pessoas, para trás, flutuando no ar!

Ao se tentar fazer melhores cálculos dos movimentos planetários, o conceito de esferas concêntricas foi abandonado em favor do movimento circular uniforme. A fim de colocar os movimentos observados dos planetas em tal esquema foi necessário inventar vários artifícios, sendo o mais bem conhecido o *epiciclo* (Fig. 3). Supunha-se que o planeta se movia sobre este pequeno círculo a uma velocidade uniforme, enquanto o centro do epiciclo se movia em velocidade uniforme sobre outro círculo, o *deferente*, cujo centro era a Terra. A razão primária para a introdução destes artifícios era a necessidade de explicar o movimento retrógrado (para trás) dos planetas quando, de vez em quando, eles traçavam alças no céu. Hoje sabemos que este efeito constitui simplesmente um movimento aparente experimentado quando a Terra está "ultrapassando" um dos planetas exteriores (Fig. 4). Para usar uma analogia do cotidiano, sabemos que ao ultrapassar um veículo mais lento ele parece mover-se para trás em relação à paisagem.

Outros artifícios também foram necessários para explicar os movimentos aparentemente desuniformes observados no céu. O *excêntrico*,

SOL

ÓRBITA DA TERRA

ÓRBITA DO PLANETA

TERRA

um artifício inventado por Apolônio (cerca de 262-190 a.C.), era um círculo com o seu centro deslocado da Terra, de tal forma que o movimento uniforme sobre este círculo pareceria não uniforme quando observado da Terra. Ptolomeu, que sumarizou e sintetizou a visão grega do Universo em seu livro chamado *Almagesto*, acrescentou outro artifício de sua própria criação– o *equant*, por meio do qual um planeta podia realizar um movimento não uniforme em seu círculo desde que havia um ponto (não a Terra) dentro do círculo a partir do qual um observador hipotético poderia ver um movimento que *pareceria* ser uniforme! Tal conceito certamente fortalecia o conceito ideal de movimento sobre trajetórias circulares além de todos os limites do razoável.

Através de uma judiciosa seleção e combinação destes artifícios, cada planeta possuindo seu próprio esquema separado, Ptolomeu foi capaz de imaginar um sistema de movimento planetário que permitia calcular as futuras posições dos planetas com surpreendente precisão. Entretanto, tratava-se de um sistema complicado e confuso que empanava o conceito de movimento circular uniforme e se afastava tanto da perfeição geométrica simples que gerações anteriores de filósofos tinham imaginado.

O sistema ptolemaico do Universo e a visão aristotélica de força e movimento, nos quais a força era necessária para manter um movimento e os objetos materiais eram constituídos de elementos que buscavam seus lugares naturais, foram transmitidos através do Oriente Médio e da Europa. Embora a visão do mundo que eles proporcionavam fosse bela e consistente, divergia da experiência e da observação sob muitos aspectos. Não obstante, permaneceu inalterada por mais de 1.000 anos: este foi o alcance da influência dos filósofos gregos.

Fig. 4 Alças planetárias. *A parte superior do diagrama mostra como, à medida que a Terra ultrapassa um planeta externo de movimento mais lento, a linha de visão da Terra até esse planeta muda de direção. A porção inferior mostra como a mutável linha de visão resulta na parada do planeta em seu movimento de oeste para leste, caminhando para trás durante algum tempo (movimento retrógrado), antes de retomar sua direção para a frente (movimento direto) e assim traçando uma alça no céu.*

2
Mutáveis visões do Universo

JUNTAMENTE COM os princípios da física aristotélica, o sistema ptolemaico de um Universo geocêntrico foi transmitido com poucas alterações significativas através do Oriente Médio e em seguida, através da Espanha, à Europa medieval. Entretanto, seria errôneo sugerir que o sistema de Ptolomeu foi aceito sem críticas. Alfonso X, Rei de Leão e Castela na Espanha de 1252 até 1284 e instigador das tábulas alfonsinas de eclipses e posições planetárias, quando apresentado pela primeira vez às complexidades desse sistema, observou: "Se Deus Todo-Poderoso me tivesse consultado antes da Criação, eu teria recomendado algo mais simples". Indubitavelmente, uma das principais objeções ao sistema ptolemaico foi sua natureza elaborada e complexa.

Objeções razoáveis começaram a ser ouvidas. O grande filósofo francês Nicolas de Oresme (1320-1382) assinalou que era mais simples imaginar a Terra girando do que a grande esfera de estrelas circulando ao seu redor e ele não foi absolutamente o primeiro a pensar assim. Não foi tão longe a ponto de aceitar a realidade *física* da rotação da Terra, mas sugeriu que a esfera mais externa devia ser circundada por um espaço vazio infinito. Estas idéias foram retomadas mais tarde por Nicolau de Cusa (1401-1464), um cardeal e filósofo alemão, advogado da abordagem experimental. Em sua opinião a Terra realmente girava sobre o seu eixo e o Universo devia ser de extensão infinita sem qualquer centro fixo e imóvel.

O trabalho de Nicolau Copérnico (1473-1543) iniciou a revolução que iria desmoronar o sistema ptolemaico e, com ele, toda a estrutura da mecânica aristotélica. Nascido em Torun, na Polônia, Copérnico tornou-se familiarizado, enquanto estudante, com a idéia de que a Terra devia se mover. Convenceu-se de que os movimentos observados dos

corpos celestes deviam ser explicados de forma mais satisfatória supondo que tanto a Terra girava sobre seu eixo quanto a Terra e os outros planetas se moviam ao redor do Sol, o qual estava localizado no centro do Universo. Em seu sistema, a ordem de distância dos planetas do Sol era a seguinte: Mercúrio, Vênus, Terra (e Lua), Marte, Júpiter, Saturno. Além de Saturno localizava-se a esfera das estrelas fixas (Fig. 5).

O sistema heliocêntrico de Copérnico era essencialmente mais simples do que o de Ptolomeu. A rotação da Terra sobre seu próprio eixo eliminava a necessidade do movimento diário das esferas das estrelas ao redor da Terra, assim como de todos os corpos celestes, enquanto

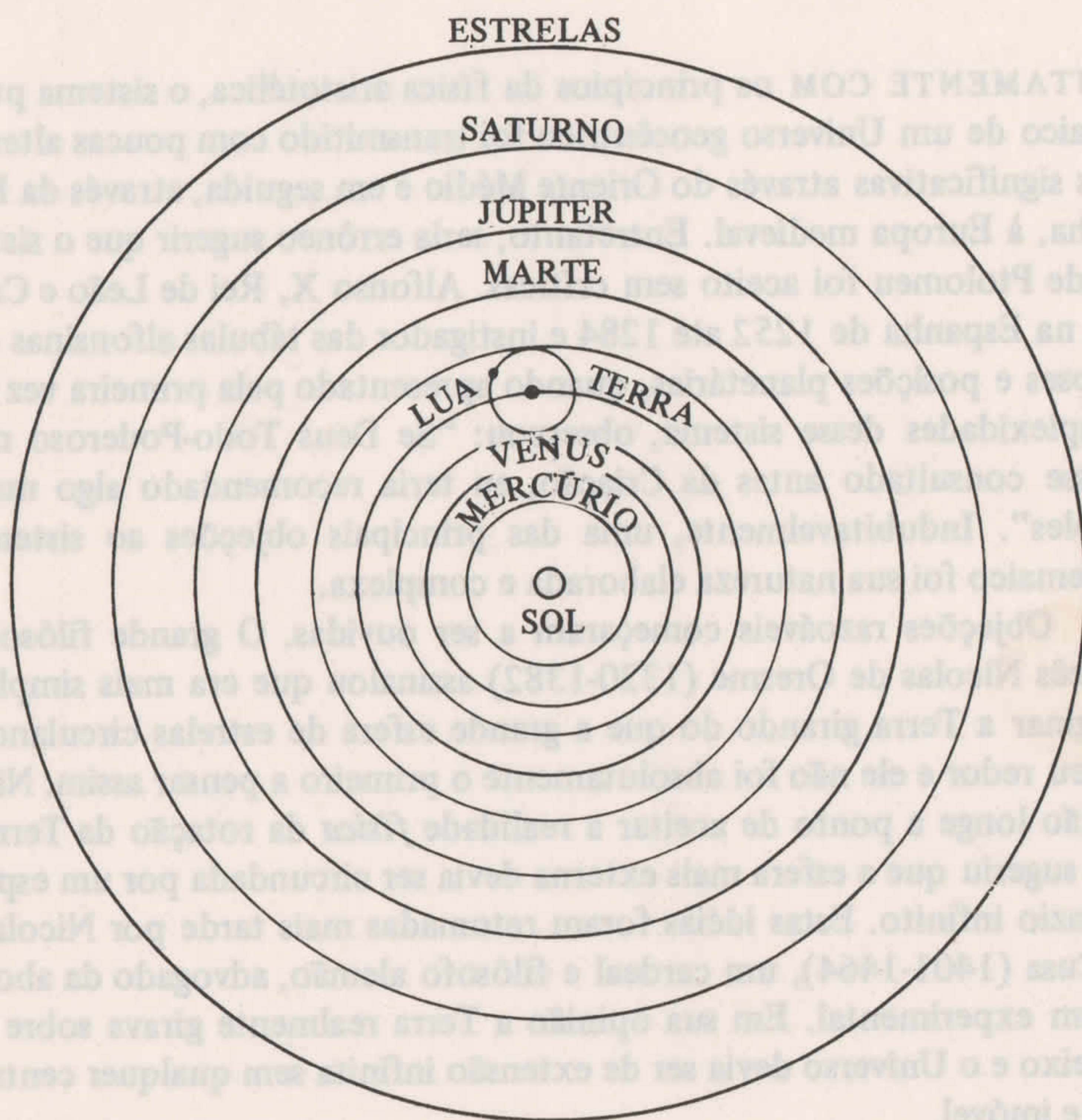



Fig. 5 O sistema de Copérnico. *No sistema heliocêntrico de Copérnico, os planetas descreviam órbitas circulares ao redor do Sol na ordem mostrada aqui. A Lua movia-se em torno da Terra; a esfera das estrelas fixas localizava-se além da órbita de Saturno.*

o movimento da Terra em torno do céu explicava tanto o movimento anual aparente do Sol ao redor da esfera celeste (Fig. 6) quanto as alças retrógradas dos planetas (veja Fig. 4). Entretanto, Copérnico aderiu rigidamente à idéia do perfeito movimento circular uniforme no firmamento e, por causa disto, ainda achou necessário criar epiciclos e excêntricos para obter mais do que um esquema rudimentar dos movimentos observados dos planetas: afinal de contas, de acordo com Copérnico, seu sistema exigia 34 movimentos circulares, consideravelmente menos do que qualquer versão do sistema ptolemaico; não obstante, argumentou-se que o sistema de Copérnico *realmente* usava 48 movimentos, enquanto uma versão do sistema ptolemaico só utilizava 40. A doutrina de que o movimento circular uniforme era o único tipo de movimento apropriado para os corpos celestes ainda pesava muito sobre a teoria planetária – na verdade, Copérnico sentia que seu sistema aderia mais verdadeiramente a esta doutrina do que o modelo ptolemaico porque o sistema de Ptolomeu incorporava o artifício da *equant*, que envolvia um movimento não uniforme.

Muitas das objeções levantadas contra a visão heliocêntrica foram as mesmas usadas no tempo dos gregos. O conceito divergia inteiramente da doutrina aristotélica do lugar natural e do movimento natural. Outra objeção referia-se à ausência dos efeitos de paralaxe. Respondendo a estas críticas, Copérnico postulou, corretamente, que a esfera das estre-

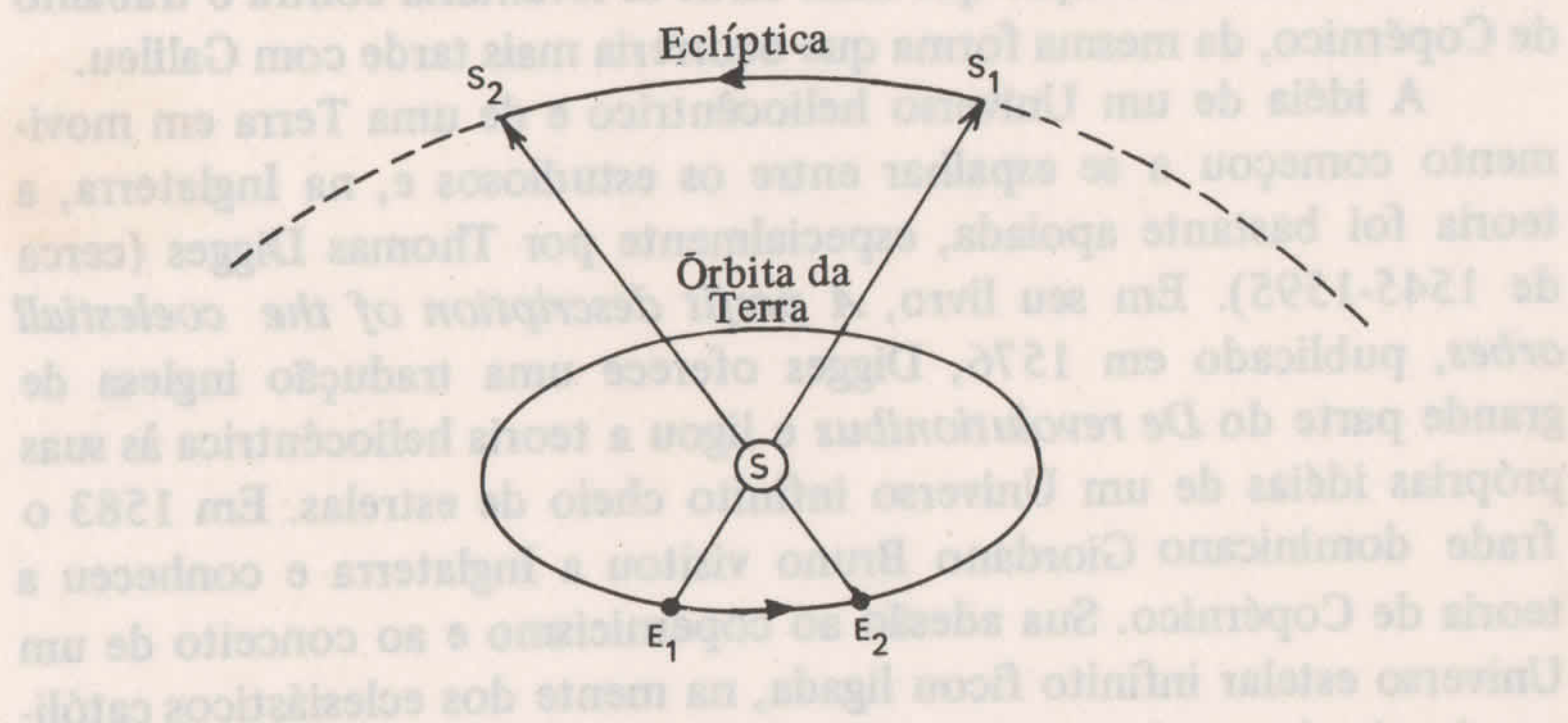



Fig. 6 Movimento aparente do Sol. *À medida que a Terra se move em Torno do Sol de E_1 para E_2, também o Sol muda de posição em relação às estrelas ao fundo de S_1 para S_2. No decorrer de um ano a Terra completa uma volta completa em torno do Sol, enquanto este último parece descrever um círculo, a* eclíptica, *ao redor da esfera celeste.*

las era tão vasta em comparação com a órbita da Terra que nenhuma paralaxe podia ser observada. Em suas próprias palavras, "a distância da Terra ao Sol nada é em relação à altura do firmamento".

Embora Copérnico tenha colocado em circulação um manuscrito contendo um esboço de suas idéias, só em 1540 ele foi persuadido por Tiedeman Giese e Georg Joachim Rheticus a publicar o seu trabalho completo. Rheticus cedeu os direitos da publicação da teoria de Copérnico a Andreas Osiander, um clérigo protestante alemão que não podia aceitar a idéia de que a Terra *realmente* se movia, uma vez que era aparentemente contrária às escrituras. Conseqüentemente, quando *De revolutionibus orbium coelestium* foi publicado em 1543, ano da morte de Copérnico, Osiander escreveu um prefácio anônimo afirmando que a idéia de uma Terra em movimento era um artifício matemático para simplificar e aperfeiçoar o cálculo das posições planetárias, ao invés de um fato real. Está bem claro no texto do livro, entretanto, que o próprio Copérnico acreditava realmente que a Terra se movia.

De revolutionibus foi dedicado ao Papa Paulo III. Causou considerável interesse e debate mas, nessa época, nenhuma oposição oficial da Igreja Católica. Os protestantes sentiram-se mais fortemente atingidos e Martinho Lutero declarou: "O louco colocará a ciência da astronomia de pernas para o ar. Mas, como declara a Bíblia Sagrada, foi ao Sol e não à Terra que Josué ordenou que parasse". Naquele tempo não havia nem sinal da reação que mais tarde se levantaria contra o trabalho de Copérnico, da mesma forma que ocorreria mais tarde com Galileu.

A idéia de um Universo heliocêntrico e de uma Terra em movimento começou a se espalhar entre os estudiosos e, na Inglaterra, a teoria foi bastante apoiada, especialmente por Thomas Digges (cerca de 1545-1595). Em seu livro, *A perfit description of the coelestiall orbes*, publicado em 1576, Digges oferece uma tradução inglesa de grande parte do *De revolutionibus* e ligou a teoria heliocêntrica às suas próprias idéias de um Universo infinito cheio de estrelas. Em 1583 o frade dominicano Giordano Bruno visitou a Inglaterra e conheceu a teoria de Copérnico. Sua adesão ao copernicismo e ao conceito de um Universo estelar infinito ficou ligada, na mente dos eclesiásticos católicos, à atitude geralmente herética de Bruno em relação à Igreja e sua administração.

Bruno foi queimado na fogueira por suas heresias em 1600 e foi grandemente em conseqüência de suas atividades que a Igreja Católica acabou por condenar a teoria de Copérnico. Mais de 70 anos após sua

publicação, *De revolutionibus* foi colocado no Índice dos Livros Proibidos em 1616.

De modo algum todos os astrônomos daquela época acharam atraente o ponto de vista de Copérnico. Tycho Brahe (1546-1601), um dinamarquês que sem dúvida foi o melhor astrônomo observador no seu tempo, não conseguia aceitar a idéia da Terra em movimento e criou sua própria hipótese (Fig. 7). Manteve a Terra firmemente no centro do Universo e aderiu ao conceito ptolemaico das estrelas fixas em uma esfera que girava ao redor da Terra uma vez por dia. Entretanto, considerava que os planetas se moviam ao redor do Sol em órbitas circulares, mas que o próprio Sol se movia em torno da Terra, um ponto de vista notavelmente similar àquele apresentado por Heracleides quase 2.000 anos antes. A despeito de suas indubitáveis atrações, a teoria de Tycho não recebeu grande apoio.

Suas precisas observações do movimento dos planetas serviram para fornecer os dados necessários para o próximo passo na teoria planetária, como veremos mais adiante. Entre suas outras valiosas observações acha-se seu estudo da supernova de 1572, uma estrela que subitamente apareceu na constelação de Cassiopéia, aumentando de brilho até atingir a intensidade do planeta Vênus e em seguida reduzindo-se após cerca de 16 meses. Suas cuidadosas observações não revelaram qualquer paralaxe, o que significava que aquele objeto devia situar-se bem além da esfera da Lua. Como não participava do movimento dos planetas, Tycho concluiu que devia situar-se na esfera das estrelas, assim contradizendo a opinião de Aristóteles aceita há longo tempo de que a esfera das estrelas fixas era imutável. Cinco anos mais tarde ele examinou um cometa e demonstrou que o mesmo se movia em uma órbita ao redor do Sol e se achava mais longe do que Vênus, assim confundindo a doutrina aristotélica – anteriormente definida pelo próprio Tycho – de que os cometas eram fenômenos atmosféricos. Entretanto, embora estas observações contradissessem a visão tradicional, ele não podia abandonar a idéia de que era impossível que a pesada Terra se movesse.

O mais famoso defensor do sistema de Copérnico foi o professor italiano Galileu Galilei (1564-1642), que talvez seja melhor conhecido pelo uso que fez do telescópio, embora suas contribuições para a mecânica tenham sido de vital importância na marcha em direção a uma teoria coerente da mecânica e a uma teoria da gravidade. Ele se familiarizou com as idéias copernicistas mas a princípio não se convenceu.

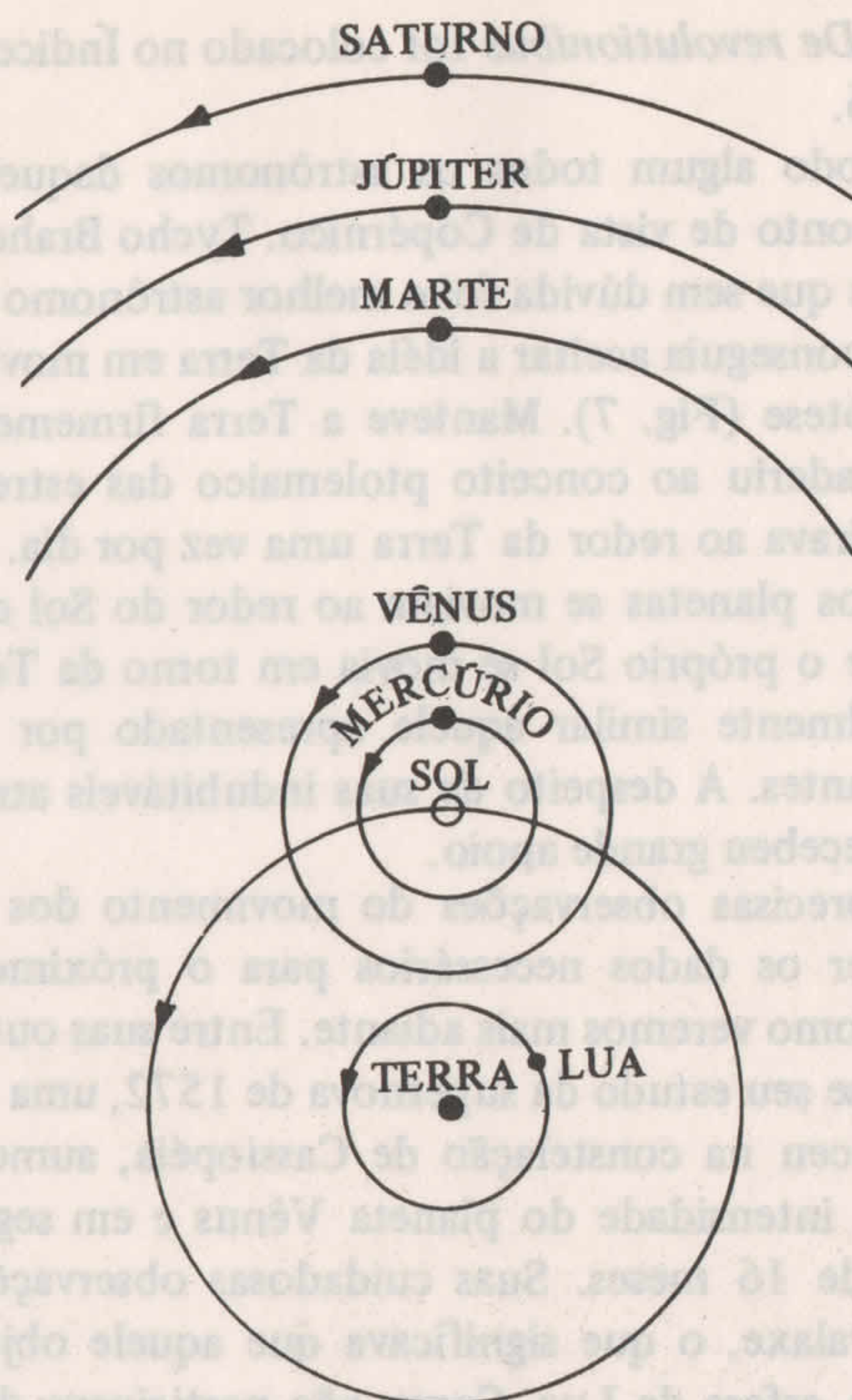



Fig. 7 O sistema de Tycho. ***De acordo com Tycho Brahe, o Sol e a Lua viajavam em torno da Terra em órbitas circulares, enquanto os planetas viajavam, também em órbitas circulares, ao redor do Sol.***

Por volta de 1604, entretanto, descobrira argumentos matemáticos que o persuadiram de que a Terra se movia e foi nesse ano também que uma brilhante nova apareceu, tendo Galileu declarado publicamente que ela se achava além da esfera da Lua, ponto de vista que se opunha à doutrina aristotélica da imutabilidade do firmamento.

Em 1609 soube da invenção do telescópio, tradicionalmente atribuída ao oculista holandês Hans Lippershey e passou a fabricar seus próprios instrumentos, um dos quais aumentava 30 vezes. No inverno daquele ano Galileu voltou seus telescópios para o céu e o que viu foi espantoso e revolucionário. Em poucos meses de observação fez descobertas que alteraram toda a concepção que o homem tinha do Cosmos.

Descobriu muitas coisas contrárias à doutrina aristotélica, inclusive evidências a favor do sistema de Copérnico. Viu que a Lua tinha montanhas, vales e outros aspectos que demonstravam ser semelhante à Terra, outro mundo, e não uma esfera lisa, perfeita e imutável de material celeste. Descobriu que havia inumeráveis estrelas fracas demais para serem vistas sem auxílio óptico e que a Via Láctea era constituída de uma massa de estrelas pouco brilhantes ao invés de um fenômeno atmosférico como Aristóteles pensava. Observou também que, embora os planetas aumentassem de tamanho e se tornassem visíveis, as estrelas ainda pareciam como pontos de luz quando observadas através do telescópio: isto sugeria que as estrelas deveriam situar-se a distâncias muito maiores.

Galileu demonstrou (embora não tenha sido esta a primeira vez) que o Sol apresenta manchas em sua superfície e com base no deslocamento destas manchas Galileu deduziu a rotação do Sol. Este astro não era corpo celeste perfeito e inefável que se pensava; ademais, se girava em torno de seu eixo, certamente a Terra podia fazer o mesmo. Galileu demonstrou que Vênus passava através de um ciclo de fases e isto não era possível de acordo com o modelo ptolemaico. Talvez as mais importantes observações publicadas em seu *Sidereus Nuncius* ("Mensageiro Estelar") em 1610 dissessem respeito aos quatro satélites que vira gravitando em torno do planeta Júpiter. Isto mostrava que a Terra não era o único centro de movimento no Universo e tornava mais plausível a hipótese copernicista que a própria Terra se movia em torno do Sol.

Por si mesmas, as observações de Galileu não constituíam provas da teoria heliocêntrica – na verdade, todos os seus resultados poderiam ser acomodados dentro do sistema de Tycho – mas condiziam com o ponto de vista de Copérnico e muito contribuíram para demolir a antiga distinção entre o céu e a Terra.

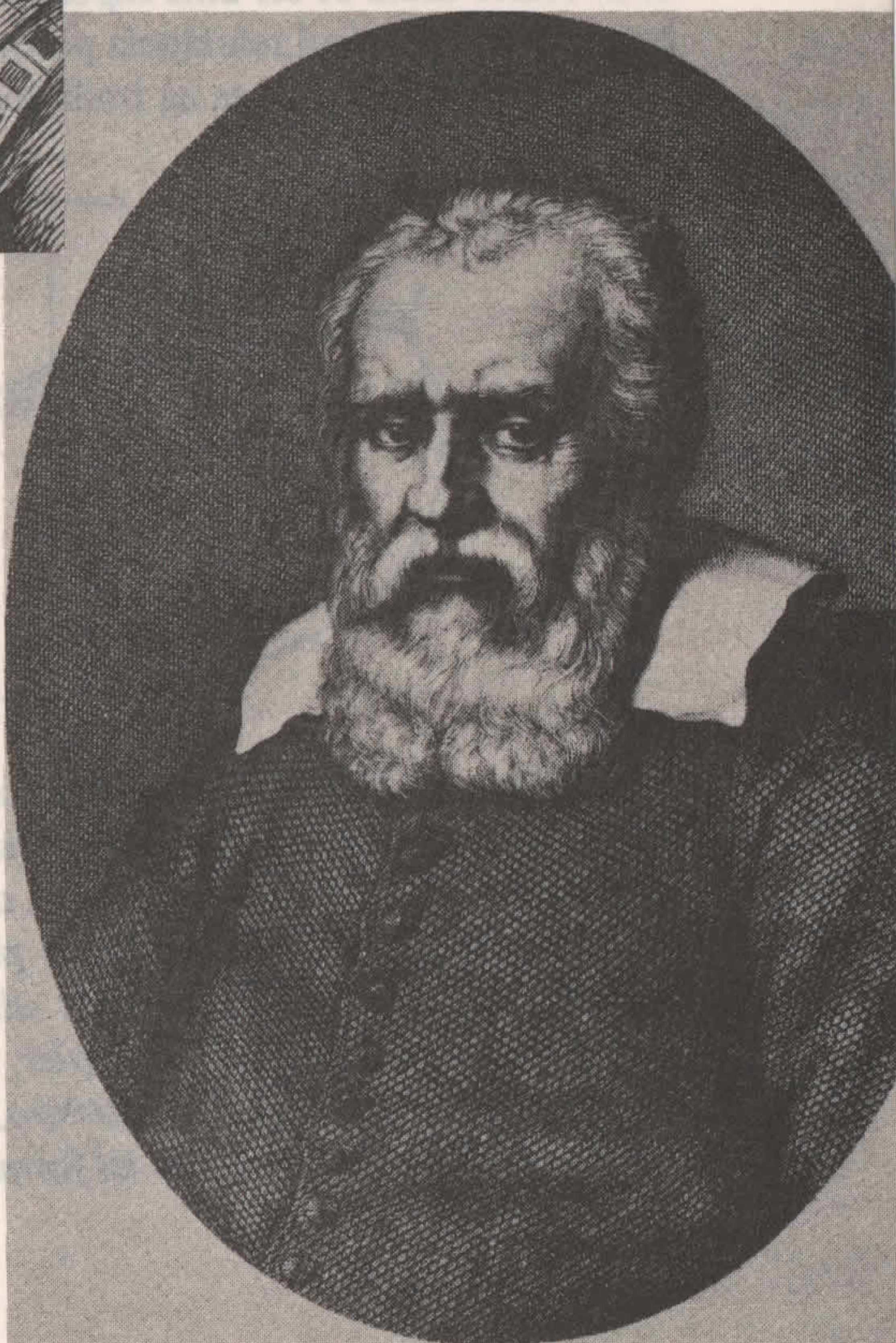
Outra figura-chave no estabelecimento do sistema heliocêntrico foi Johannes Kepler (1571-1630). Kepler nascera em Weil, na província alemã de Württemberg, em circunstâncias pouco felizes e sua vida foi cheia de dificuldades. Não obstante, embora sob muitos aspectos suas idéias estivessem mais sintonizadas com o antigo mundo místico, foi ele quem deu o golpe de misericórdia na teoria geocêntrica e no dogma do movimento circular uniforme no firmamento.

Em seu primeiro trabalho desenvolveu um sistema heliocêntrico de planetas no qual as distâncias planetárias eram determinadas em referência às formas de sólidos geométricos fundamentais; embora este

Teoria do movimento dos projéteis concebida por Aristóteles. Atirador disparando um canhão cuja elevação foi calculada usando uma régua padronizada com pesos de chumbo. De acordo com a física aristotélica nenhum corpo podia realizar mais de um movimento de cada vez e a trajetória do projétil, por isso, tinha de consistir de duas linhas retas separadas. De Daniele Santbech, Problematum Astronomicorum, *Basiléia, 1561. (Ann Ronan Picture Library.)*

Nicolau Copérnico (1473–1543), o astrônomo polonês cujo sistema heliocêntrico do Universo, publicado em 1543, iniciou uma revolução em nossa concepção do Universo. (BBC Hulton Picture Library.)

Johannes Kepler (1571–1630), o astrônomo alemão que, a partir de suas análises das precisas medições dos movimentos dos planetas realizadas por Tycho Brahe, foi capaz de demonstrar que a Terra e os planetas viajam em torno do Sol em órbitas elípticas. Suas leis do movimento planetário representaram um elo vital na linha de raciocínio que levou Newton a sua lei da gravitação universal. (BBC Hulton Picture Library.)

Galileu Galilei (1563-1642), o físico italiano e astrônomo que defendeu o sistema de Copérnico. Suas observações telescópicas modificaram notavelmente nossa visão dos corpos celestes e suas experiências contribuíram grandemente para a derrocada da física aristotélica, ao mesmo tempo proporcionando a base para o desenvolvimento subseqüente das leis do movimento elaboradas por Newton. (BBC Hulton Picture Library).

aspecto de seu trabalho seja considerado hoje praticamente sem valor (e contemporâneos tais como Galileu descarregassem suas críticas sobre ele), sua publicação em 1596 em seu livro, com um título de 24 palavras usualmente abreviado para *Mysterium Cosmographicum*, atraiu o interesse de Tycho, que convidou Kepler a juntar-se a ele em Praga para ajudar a analisar as observações que Tycho fizera a respeito do movimento dos planetas.

Em 1600 Kepler começou a trabalhar sobre o movimento do planeta Marte. Tentou todas as espécies de combinações de epiciclos, deferentes, excêntricos e *equants*, em um esforço para explicar o movimento observado do planeta e foi capaz, desta forma, de chegar a uma precisão de 8 minutos de mensuração angular (pouco mais de um oitavo de um grau, ou um quarto do diâmetro aparente da Lua no céu). Isto não foi suficiente para Kepler: em suas palavras, "estes oito minutos apenas abriram um caminho para uma completa reforma da astronomia". Finalmente, após cerca de 70 tentativas, atinou com a resposta. A órbita de Marte tinha de ser uma *elipse*. Esta foi uma conclusão que ele aceitou com considerável relutância porque, tal como seus contemporâneos, acreditava arraigadamente na tradição do movimento circular perfeito.

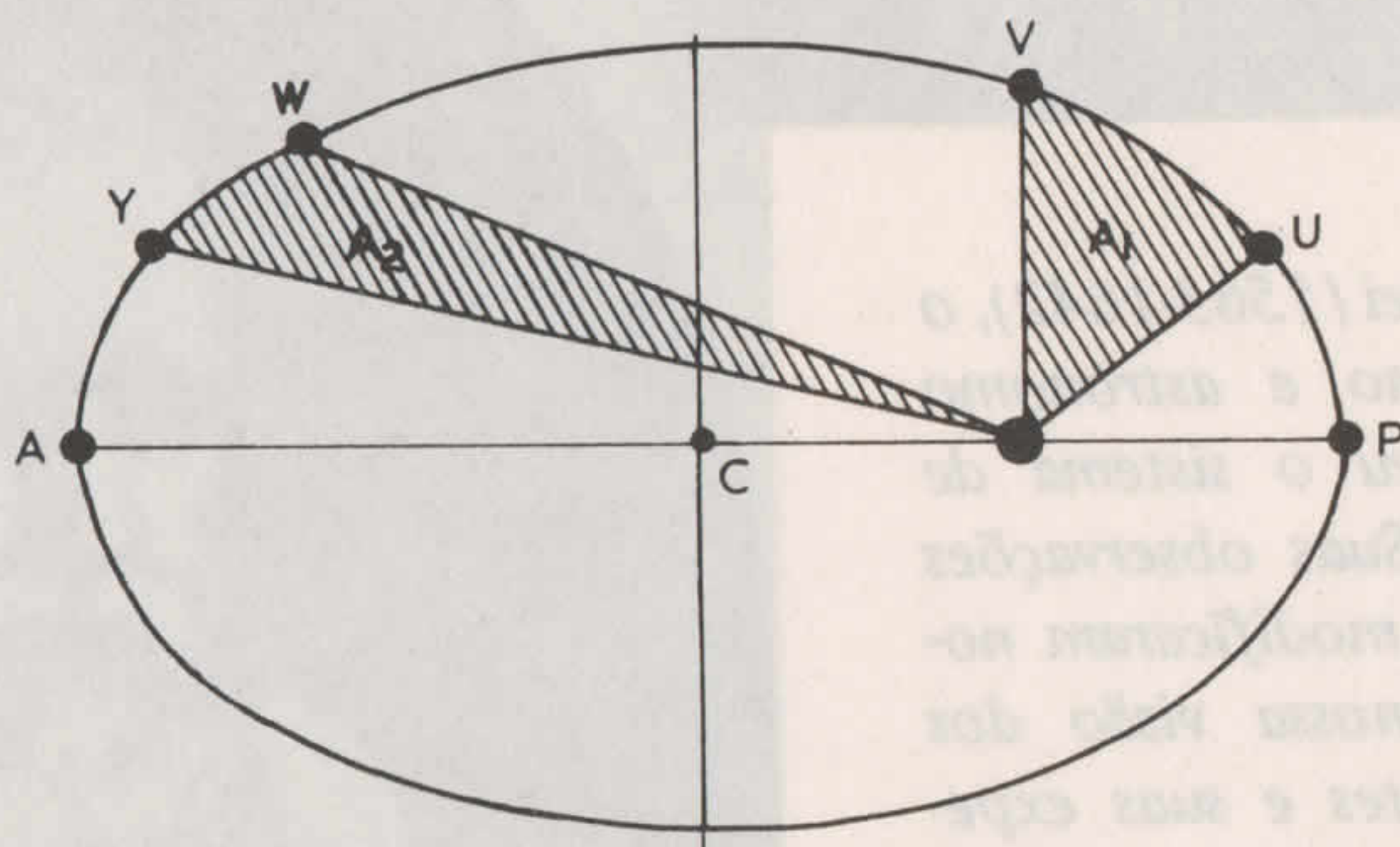



Fig. 8 Leis do movimento planetário, de Kepler. *A órbita de um planeta é uma elipse com o Sol localizado em um foco dessa elipse: AP é o eixo maior; AC é o eixo semimaior, ou "distância média ao Sol" na terceira lei de Kepler. O ponto mais próximo ao Sol (P) é denominado periélio, enquanto o ponto mais distante (A) é chamado afélio. De acordo com a segunda lei de Kepler, se o planeta se move de U para V em determinado período de tempo, ele se moverá de W para Y no mesmo período de tempo, de tal forma que a área* A_1 = *área* A_2.

Suas descobertas foram publicadas em 1609 na *Astronomia Nova* e em seus últimos anos ampliou seu trabalho para incluir até mesmo os satélites de Júpiter, publicando seus resultados entre 1619 e 1621. Entre a grande massa de informações úteis e especulações confusas achavam-se três importantes leis – as duas primeiras foram publicadas em *Astronomia Nova*, a terceira em *Harmonia Mundi* (1619) –, conhecidas hoje como as leis de Kepler para o movimento planetário. Na terminologia atual, são as seguintes:

Primeira lei: A órbita de cada planeta ao redor do Sol é uma elipse, localizando-se o Sol em um dos focos da elipse (Fig. 8);

Segunda lei: O raio vetor (isto é, a linha que liga o planeta ao Sol) percorre áreas de espaços iguais em tempos iguais, de tal forma que, em suas órbitas elípticas, os planetas se movem mais depressa quando próximos ao Sol do que quando mais afastados;

Terceira lei: O quadrado do tempo periódico de um planeta (o tempo necessário para ele completar uma órbita em torno do Sol) é diretamente proporcional ao cubo de sua distância média ao Sol (por "distância média" nos referimos ao eixo maior da elipse).

A terceira lei implica que a distância média de um corpo ao Sol pode ser calculada conhecendo-se seu período orbital. A relação se torna muito simples se preferimos fazer nossos cálculos em termos da unidade astronômica (a distância média entre o Sol e a Terra) e o ano (o período orbital da Terra). Como exemplo, se o período orbital de um planeta é de oito anos podemos deduzir que sua distância média ao Sol é de 4 UA, uma vez que $8^2 = 64 = 4^3$.

As idéias revolucionárias de Kepler não foram imediatamente aceitas pelos defensores da teoria de Copérnico. Galileu, por exemplo, ainda estava às voltas com movimentos circulares e parece nunca ter aceito a idéia do movimento elíptico. Entretanto, a simplicidade do sistema e seu sucesso no cálculo das posições planetárias asseguraram que, à medida que o século XVII avançava, se tornasse mais e mais amplamente aceito pela comunidade científica.

Foi assim que Kepler encerrou para sempre mais de 2.000 anos de adesão dogmática à crença da perfeição do firmamento e com a idéia de que o movimento circular perfeito era o único possível para os mundos celestiais. Além disso, a Terra finalmente foi destronada de sua posição central no esquema do Universo. A física, a astronomia e a filosofia jamais poderiam ser as mesmas.

3
A emergência da gravitação universal

KEPLER DEMONSTROU a maneira pela qual os planetas se movem, mas *por que* os planetas se movem desta maneira? Que força motivadora podia manter os planetas movendo-se ao longo de órbitas elípticas, aumentando e diminuindo suas velocidades de acordo com a segunda lei de Kepler? Kepler tinha suas próprias idéias, como veremos mais adiante; mas antes de examiná-las precisamos voltar aos tempos medievais em busca dos primeiros surtos de oposição à doutrina aristotélica da força e do movimento.

Um dos primeiros a desafiar parte da teoria convencional do movimento foi Philoponos, um crítico grego da primeira parte do século VI a.D. Ele negou que a resistência de um meio fosse um ingrediente essencial na teoria do movimento, mantendo a noção de que o efeito do meio meramente retardava a queda dos corpos. Na ausência de um meio, os corpos viajariam com velocidade finita; os corpos não atingiriam velocidade infinita no vácuo. Também rejeitou a idéia de que a velocidade dos corpos em queda livre fosse determinada pelos seus pesos. Além disso, opôs-se à noção aristotélica de que a força fosse transmitida através do ar para impelir um projétil tal como uma seta. Ao invés disso, sugeriu que uma força é imprimida à seta quando ela é disparada do arco e que esta força reside na seta e a mantém até que a resistência detém seu movimento.

Observações similares foram feitas por comentaristas posteriores, mas a teoria aristotélica continuou inalterável. Durante o século XIII e o início do XIV outra idéia começou a emergir: o conceito de que os corpos podiam possuir uma resistência interna. Se os corpos reais eram uma mistura de elementos, então a proporção de elementos leves e pesados em um corpo determinaria seu movimento – o elemento do-

minante determinaria a direção do movimento ("para baixo" no que se refere aos corpos pesados) enquanto os outros tendem a contrariar este movimento. Esta linha de argumentação levou Thomas Bradwardine (cerca de 1290-1349), professor de Oxford, à interessante sugestão de que corpos de composição similar mas de peso diferente cairiam com a mesma velocidade porque continham a mesma proporção de elementos leves e pesados e a relação entre a força motivadora e a resistência devia ser a mesma.

A idéia de uma força motivadora imprimida, que fora trazida por Philoponos, obteve considerável popularidade no século XIV, sendo desenvolvida por Jean Buridan (cerca de 1300 – cerca de 1360), em Paris. De acordo com Buridan, quando um corpo é colocado em movimento, recebe certa quantidade de *ímpeto* que lhe permite continuar a mover-se naquela direção até o ímpeto se esgotar, após o que o corpo deverá mover-se em direção ao seu lugar natural. Buridan definiu o ímpeto como o peso multiplicado pela velocidade, um conceito próximo da nossa definição atual de momento. Embora ele encarasse claramente o ímpeto em termos de força, este conceito deve ser encarado, não obstante, como um passo na direção do importante conceito posterior de inércia.

A reviravolta real nas idéias foi iniciada por Copérnico, com a publicação, em 1543, de sua teoria heliocêntrica; mas, embora ele destronasse a Terra de sua posição central, essencial para o ponto de vista aristotélico, foi incapaz de produzir uma nova teoria de força em movimento para explicar os movimentos observados. Foi seu defensor Galileu quem colocou os alicerces da mecânica, essenciais para o estabelecimento da teoria da gravitação de Newton.

Além de suas observações astronômicas imensamente importantes, Galileu realizou avanços fundamentais na ciência da mecânica. Este trabalho apareceu em muitas de suas publicações, sendo a mais notável delas *Dialogo . . . sopra i due massime sistemi del mondo, Tolemaico e Copernico* ("Diálogo . . . relativo a dois sistemas do mundo, o ptolemaico e o copernicista" – daqui para a frente designado como o *Diálogo*), publicado em 1632 e banido logo em seguida; e *Discorsi e dimonstrazioni matematiche intorna à due nuove scienzi* ("Discursos e demonstrações matemáticas sobre duas novas ciências" – daqui para a frente designado como *Discursos*), publicado na Holanda em 1632. Em ambos os trabalhos os assuntos eram debatidos por dois personagens centrais, Salviati, representando o moderno ponto de vista copernicista

(e assim agindo como um representante das próprias opiniões de Galileu) e Simplício, representando o tradicional ponto de vista aristotélico. O terceiro personagem, Sagredo, fazia o papel do "imparcial", cético de mente aberta, que precisaria ser convencido de um ponto de vista ou outro.

O *Diálogo* colocou Galileu em situação tão difícil perante as autoridades da Igreja Católica, especialmente quando o Papa Urbano VIII achou que Simplício era uma caricatura de si próprio, que o autor acabou diante da inquisição e teve de abjurar as heresias copernicistas que andara divulgando. Após este fato, em junho de 1633, foi confinado a um estado de prisão domiciliar até sua morte, em 1642.

Entre suas muitas realizações, Galileu estabeleceu a relação matemática entre a distância percorrida por um corpo em queda livre e o tempo durante o qual esteve caindo. Demonstrou que, nos segundos sucessivos após ter sido largado o corpo cairá através de 1, 3, 5, 7,... unidades de distância, de tal forma que a distância total percorrida no final de cada segundo seria 1, 4, 9, 16, ... unidades; isto é, a distância percorrida em queda livre é proporcional ao quadrado do tempo. Este é o exemplo da forma mais simples de aceleração, a aceleração *uniforme*, na qual incrementos iguais de velocidade são acrescentados a cada segundo; a velocidade de um corpo que está sendo acelerado mostrou-se proporcional ao tempo, em vez de proporcional à distância, como anteriormente se supunha. A natureza da aceleração foi um dos temas centrais de debate na mecânica.

Galileu também demonstrou que, desprezando os efeitos da resistência atmosférica, todos os corpos, independentemente de seu peso, sofrem uma aceleração idêntica em direção ao solo. Se um corpo pesado e um corpo leve forem largados ao mesmo tempo do alto de uma torre elevada, atingirão o solo no mesmo instante. Isto era contrário à opinião tradicional de que quanto mais pesado o objeto mais depressa deveria cair. (Diz-se que ele testou sua hipótese deixando pesos caírem da torre inclinada de Pisa, mas esta história certamente não é verdadeira.) Galileu, mais tarde, contradisse Aristóteles ao mostrar que o vácuo podia existir e demonstrando como, em princípio, podia produzi-lo. Cerca de 30 anos mais tarde Robert Boyle testou a afirmação de Galileu acerca dos corpos em queda livre e demonstrou que em um recipiente onde se fez o vácuo uma pena e uma moeda de ouro caem com a mesma velocidade.

Em flagrante contradição com a física aristotélica, Galileu de-

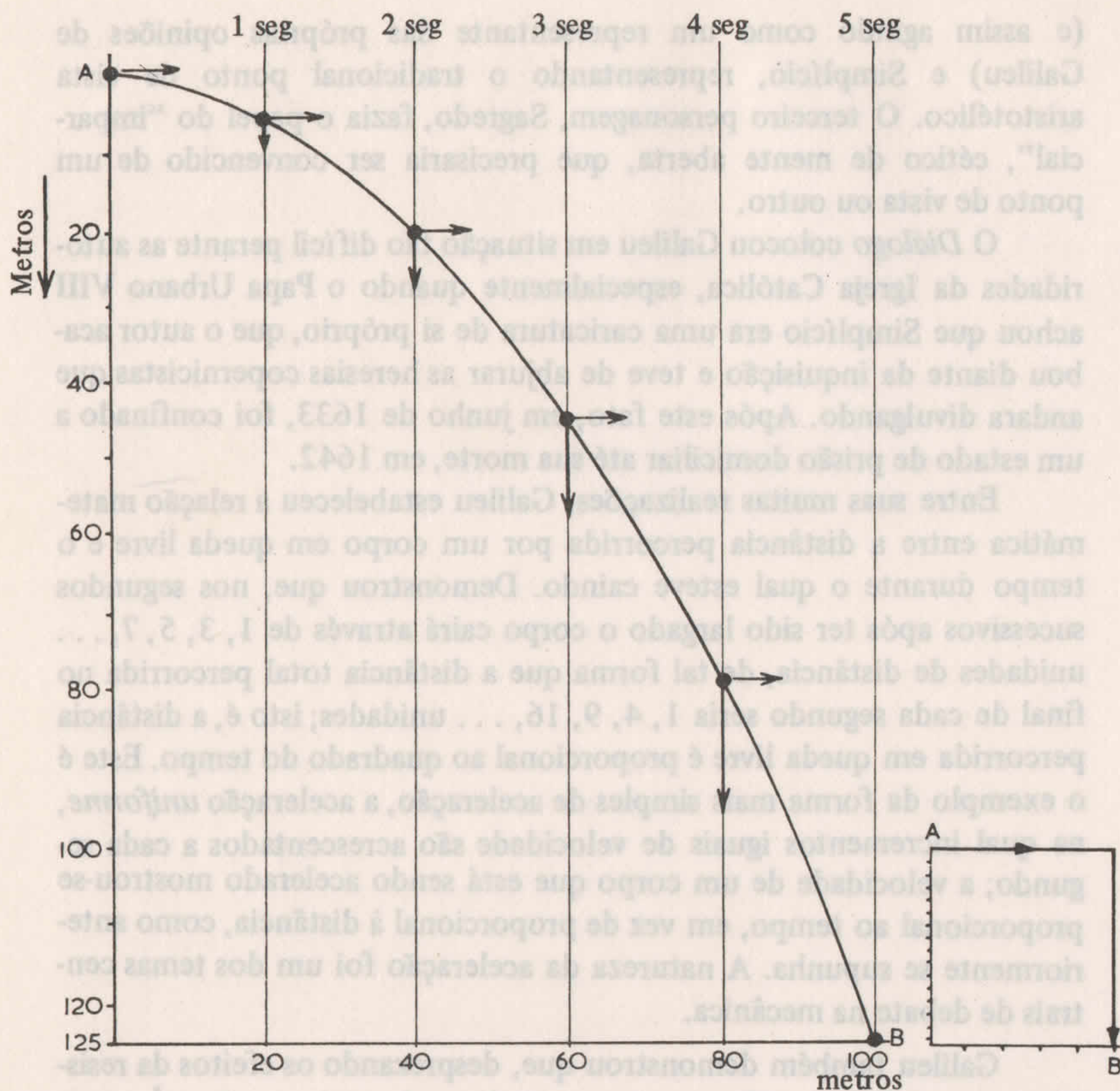



Fig. 9 O movimento de um projétil. *Ptolomeu demonstrou como um corpo podia realizar duas espécies de movimento ao mesmo tempo. Se um corpo fosse arremessado em direção horizontal do alto de um penhasco, manteria uma constante velocidade para a frente em seguida. Entretanto, também seria acelerado para baixo sob a influência da "gravidade". Sua velocidade para baixo aumentaria da forma mostrada pelas setas verticais. A combinação dos movimentos horizontal e vertical leva a uma trajetória curva "parabólica". No exemplo apresentado, a velocidade para a frente é de 20 m/seg e a altura do penhasco é de 125 m; após 5 segundos o projétil cai a 100 m da base do rochedo (os números foram arredondados). Ao lado vemos a idéia aristotélica deste fato: o projétil primeiro se moveria em linha reta paralela ao solo e em seguida cairia verticalmente.*

monstrou que um corpo podia realizar duas espécies diferentes de movimento ao mesmo tempo. Por exemplo, de acordo com Galileu, uma seta disparada horizontalmente de um arco mover-se-ia para a frente em quantidades iguais em unidades iguais de tempo, assim como cairia em direção ao solo de acordo com a lei de Galileu para os corpos em queda livre; uma seta disparada em um ângulo para cima seguiria as mesmas regras. Ambos os movimentos teriam lugar ao mesmo tempo, resultando que a trajetória seguida por este projétil seria uma curva conhecida como parábola (Fig. 9). Como vimos, de acordo com Aristóteles, o projétil percorreria uma linha reta até que seu movimento para frente cessasse e então cairia verticalmente até o chão.

Galileu afirmou que a força não era necessária para manter o movimento e chegou muito perto, na verdade, da descoberta do que mais tarde se tornou conhecido como a primeira lei do movimento de Newton. Nos *Discursos* assinalou que uma vez que uma velocidade fosse imprimida a um corpo em movimento sobre um plano horizontal, o corpo continuaria a mover-se nessa direção, desde que as causas externas de aceleração ou de retardamento fossem removidas, isto é, uma vez que um corpo seja posto em movimento, continuará a viajar na mesma direção a menos que seja obrigado a agir de forma diferente. Argumentou que, embora os corpos pesados tivessem a inclinação para cair e não a tivessem para subir, eram indiferentes ao movimento uniforme em um plano. Uma vez colocado em movimento sobre um plano, um corpo não teria inclinação nem a acelerar nem a desacelerar. Todos estes pontos de vista, certamente, eram contrários à opinião estabelecida de que a força era necessária para manter qualquer espécie de movimento.

O que Galileu obtivera fora uma forma da lei da *inércia* (sendo esta, em termos modernos, a resistência de um corpo a qualquer alteração em seu estado de movimento, isto é, resistência à aceleração ou desaceleração). Entretanto, o conceito de Galileu era o da "inércia circular", pelo qual um corpo continuaria a se mover em trajetória circular indefinidamente na ausência de forças. Em pequena escala, sobre a Terra, o movimento prosseguiria em linha reta mas, uma vez que a Terra era redonda, o "plano horizontal" sobre o qual o movimento constante teria lugar deveria ser paralelo à superfície da Terra. Ele não conseguiu conceber o movimento prosseguindo indefinidamente em uma linha reta infinita. A Terra e os planetas se moviam ao redor do Sol em órbitas circulares sem a ação de qualquer força, argumentou Galileu,

porque o movimento circular era o movimento natural. No *Diálogo*, afirmou que um corpo acelera-se em direção ao seu objetivo e reluta em deixá-lo: em um círculo o corpo tanto está se aproximando quanto se afastando do seu objetivo natural e o resultado prático seria o movimento em velocidade uniforme. Ele invocou esta noção de "inércia circular" por que um objeto largado do alto de uma torre bate ao pé da torre em vez de atingir o solo a alguma distância para oeste: em virtude de sua inércia circular o objeto tem uma tendência natural a mover-se com a mesma velocidade da Terra de tal forma que, quando liberado, continua seu movimento circular uniforme ao redor do centro da Terra ao mesmo tempo que sofre uma aceleração em direção ao centro da Terra.

Assim sendo, embora não abalasse as bases da doutrina predominante do movimento circular uniforme dos planetas, apesar de conhecer o trabalho de Kepler, Galileu derrubou muitos dos pilares fundamentais da mecânica aristotélica: demonstrou que a força não é necessária para o movimento; que os corpos podem executar diferentes espécies de movimento ao mesmo tempo; que os corpos em queda livre sofrem a mesma aceleração, independentemente de seu peso; e que o vácuo é possível. Inegavelmente, ele colocou os alicerces sobre os quais Newton iria erguer a nova mecânica.

Quanto à natureza da gravidade, Galileu não tinha nenhuma idéia; e deixou a tarefa para aqueles que julgava que tivessem. No *Diálogo*, quando Simplício é indagado o que faz cair os corpos sobre a Terra, responde: "Todo mundo sabe que é por causa da gravidade". A isto Salviati replica: "Você está errado, Simplício, o que você deve dizer é que todo mundo sabe que isso é chamado gravidade". Em outras palavras, Galileu estava assinalando que nada há de errado em dar um nome a alguma coisa, mas isto não significa que compreendamos o que "alguma coisa" é.

Magnetismo celestial de Kepler

KEPLER DEFENDEU a idéia de que a força era necessária para manter o movimento e, por isso, alguma força devia agir para impelir os planetas ao longo de suas órbitas. Afirmou que esta força devia emanar do Sol e que ela devia diminuir com a distância porque, como argumentou na *Epitome* (1621), uma vez que as velocidades dos planetas dependem

de suas distâncias ao Sol, certamente a força motivadora deveria originar-se no próprio Sol. Asseverou que a própria luz não podia ser responsável pelo impulso dado aos planetas, porque se assim fosse a Terra pararia todas as vezes que houvesse um eclipse.

Kepler foi muito influenciado pela descoberta, realizada pelo médico inglês William Gilbert, de que a Terra inteira se comportava como um gigantesco ímã, uma vez que se sabia que o movimento de um ímã podia produzir movimento em outro, mesmo a uma distância considerável. Kepler encampou e desenvolveu esta idéia, sugerindo que filetes magnéticos que emanavam do Sol em rotação agiam sobre os planetas para impeli-los, embora ele fosse incapaz de produzir uma explanação convincente de seus movimentos elípticos. Simpatizava com a idéia de que existia alguma espécie de atração geral entre os corpos, de tal forma que corpos distantes situados no espaço tenderiam a mover-se um em direção ao outro e a se unirem. Na verdade, Kepler sustentou que o espaço devia ser um vácuo e assim esposou a possibilidade de que as influências podiam se estender através do espaço vazio; isto representou um considerável afastamento da opinião predominante. Argumentou que as marés do oceano deviam-se à influência da Lua e, em menor extensão, ao Sol.

Embora muitos dos seus pontos de vista fossem confusos e incorretos, foram notavelmente antecipatórios da gravitação newtoniana em numerosos aspectos; e nesta área ele provou ser mais perceptivo do que Galileu, que rejeitou a sugestão de que forças emanadas do Sol pudessem mover a Terra e também negou a sugestão de Kepler de que era a atração da Lua que causava as marés, em favor de uma teoria bastante errônea de sua autoria.

Avanços posteriores na mecânica

DA ÉPOCA DE KEPLER e Galileu até o grande salto de Newton para a frente a ciência da mecânica e o conceito da gravidade foram obscurecidos por uma profusão e confusão de idéias, conceitos e mal-entendidos. Lentamente, os conceitos essenciais de força, massa, inércia, velocidade e aceleração tornaram-se mais claramente definidos; ao mesmo tempo a visão do mundo heliocêntrico tornou-se amplamente estabelecida e o cenário estava pronto para uma grande síntese de idéias em um conjun-

to coerente. Dos muitos que contribuíram para o debate e que, em alguns casos independentemente, produziram importantes fragmentos deste elaborado quebra-cabeças, somente alguns podem ser mencionados aqui.

O grande filósofo francês René Descartes (1596-1650), em seus *Princípios de Filosofia* (1644), estabeleceu uma lei da inércia que foi essencialmente a mesma que mais tarde veio a ser chamada a primeira lei do movimento, de Newton. De acordo com a sua visão das coisas, o estado natural do movimento era o movimento uniforme em linha reta: um corpo continuaria a mover-se em velocidade uniforme, em linha reta, a menos que alguma coisa (uma força, na linguagem moderna) agisse para modificar seu estado de movimento. Esta afirmação era muito mais completa do que o conceito de inércia estabelecido por Galileu, que estava preocupado com o movimento sobre planos e que, com efeito, contribuiu para um princípio de movimento circular uniforme. De acordo com a filosofia de Descartes, todas as mudanças no movimento devem ser causadas por impactos entre corpos materiais. Por isso, os corpos em queda livre devem ser impelidos de volta à Terra por correntes de partículas sutis e invisíveis.

Uma notável tentativa para explicar os movimentos dos planetas foi realizada pelo filósofo natural italiano Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), que publicou suas idéias em 1666. Em essência, ele propôs que cada planeta se move em conseqüência de três causas: (1) uma força motriz que o impelia ao longo de sua órbita, (2) uma atração "ou apetite" em relação ao Sol e (3) uma tendência equilibradora do planeta a afastar-se do Sol.

Borelli sugeriu que a luz do Sol era a força motriz que impelia os planetas. À medida que o Sol girava, sua luz, atingindo os planetas, exerceria um débil efeito que, durante um período de tempo suficientemente longo, teria impulsionado os planetas até suas velocidades atuais; os planetas teriam atingido um movimento constante quando suas velocidades alcançaram as velocidades das partículas de luz que os atingiam. (Não estava claro, nesta argumentação, por que os planetas se moviam com velocidades diferentes.) Aceitando de Descartes de que os corpos continuam a se mover em linha reta a menos que influenciados por alguma força, Borelli argumentou que uma força devia agir para desviar os planetas das órbitas em linha reta e mantê-los em órbita ao redor do Sol. De acordo com o seu ponto de vista esta força devia estar relacionada com o Sol. Se os corpos pesados apresentam uma tendência

natural a cair e a se unirem com a Terra, talvez, sugeriu ele, os planetas tenham um "apetite" natural para se unirem com o Sol. Para evitar que os planetas caiam no Sol, há alguma outra influência sendo exercida — uma tendência natural dos corpos que se movem em um círculo (ou em uma elipse) a se afastar do centro. Este foi um conceito discutido por Descartes. O físico holandês Christiaan Huygens (1629-1695) chamou-a força centrífuga.

Tal como seus predecessores, Borelli não foi capaz de realizar o salto conceitual necessário para ver que o movimento circular constitui um movimento constantemente acelerado devido à ação de apenas uma força, a qual se dirige para o centro do círculo. Ao fazer esta observação não devemos criticar Borelli, uma vez que muitos de nós ainda hoje tendemos a visualizar o movimento orbital de uma forma muito semelhante à dele. Tentamos a grosso modo "explicar" o fato de que um satélite permanece em órbita em torno da Terra dizendo que a atração gravitacional da Terra é equilibrada por uma força centrífuga igual e oposta; por isso o satélite "fica lá em cima". Embora, como um exercício em sala de aula possamos obter fórmulas corretas para descrever o movimento circular através destes meios, de fato trata-se de um ponto de vista totalmente errôneo. A força centrífuga é apenas uma força *aparente*; a única força real que atua sobre o satélite é a força da gravidade. Consideremos a familiar analogia de girar uma pedra amarrada na ponta de um barbante. A fim de manter a pedra movendo-se em um círculo temos de exercer uma força — conhecida como força centrípeta (a força que busca o centro) — sobre o fio, isto é, temos de manter um puxão no fio. Se cortarmos o fio, a pedra não sairá radialmente para fora (como deveria fazer se estivesse atuando uma força dirigida para longe do centro), mas voa ao longo de uma tangente; isto é, continua em linha reta, em velocidade uniforme, na direção em que ia no momento em em que o fio foi cortado, assim obedecendo a lei da inércia tal como foi estabelecida por Descartes.

Os filósofos naturais do século XVII foram prejudicados em seus esforços pela confusão em torno das definições das quantidades fundamentais. A velocidade foi bem compreendida, o conceito de aceleração foi bem esclarecido por Galileu, mas as quantidades que hoje chamamos massa, peso, força e inércia foram mal formuladas. Consideráveis esclarecimentos parecem dever-se ao filósofo francês Edmé Mariotte (1620-1684): a massa, a quantidade de matéria em um corpo, dependia das dimensões e da densidade desse corpo e era algo diferente do

peso do corpo. Ademais, argumentava ele, todo corpo apresenta uma resistência à aquisição de movimento que depende de sua massa. Se duas bolas forem colocadas em plano horizontal e atingidas pelo mesmo impacto, a que tiver menos massa das duas adquirirá maior velocidade. O conceito de "peso", que estava associado com a queda dos corpos em direção à Terra, não se aplicaria aqui e por isso teria de existir alguma outra qualidade. Ele desprezou a possibilidade de que a resistência do ar tivesse qualquer efeito significativo, uma vez que nesse caso seria o tamanho da bola que governaria a resistência. Embora uma bola de chumbo pesando um quilo fosse menor do que uma bola de madeira pesando meio quilo, apresentava maior resistência à aceleração. Vemos aqui a emergência do conceito segundo o qual, embora peso e massa estivessem relacionados (um corpo mais pesado tem mais massa do que um corpo mais leve) é a massa que determina a resistência de um corpo ao movimento. Os conceitos de massa e inércia (resistência à aceleração), tal como discutimos aqui, são essencialmente os mesmos usados na mecânica de Newton.

O debate sobre a natureza da gravidade (este termo achava-se muito difundido no século XVII) continuou. Era a gravidade um agente externo atuando sobre os corpos ou era a gravitação uma propriedade interna possuída por eles? Tratava-se de uma influência atrativa que podia atuar entre corpos amplamente separados ou devia-se ao impacto de partículas invisíveis? Para os defensores de Huygens e outros seguidores de Descartes, a idéia da atração – a ação de um corpo sobre outro à distância – era absurda. Esta idéia cheirava a ocultismo, a influências místicas. Certamente, só a ação de partículas sobre os corpos podiam afetar seu movimento.

Pierre Gassendi (1592-1655) foi um dos que encararam a gravitação como uma força externa que atuava sobre os corpos para atirá-los à Terra. Considerava que tanto a gravidade quanto o magnetismo deviam-se a correntes ou "filetes" de partículas imperceptíveis que emergiam da Terra e arrastavam o corpo de volta a sua fonte. Em um espaço completamente vazio, onde não estivessem presentes os filetes gravitacionais, os corpos uma vez colocados em movimento continuariam a mover-se em velocidade uniforme percorrendo uma linha reta; mas próximo de um corpo como a Terra os corpos sofriam a ação de filetes gravitacionais e tombavam de suas trajetórias lineares. As idéias de Gassendi não parecem ter tido qualquer efeito direto sobre o desenvolvimento da gravitação newtoniana, mas são mencionadas aqui para ilus-

trar que nesse tempo muitas idéias relativas à gravidade e ao movimento celestial eram correntes e que vários indivíduos separadamente divisavam ou se aproximavam estreitamente dos conceitos que faziam parte da grande síntese de Newton.

As teorias de Newton emergem

TRÊS DAS PRINCIPAIS personalidades científicas de meados do século XVII, na Inglaterra, foram Robert Hooke (1635-1703), o arquiteto Christopher Wren (1632-1723) e Edmund Halley (1656-1742), que mais tarde se tornaria Astrônomo Real e obteria fama duradoura por seu trabalho sobre os cometas. Eles eram membros proeminentes da Sociedade Real, fundada em 1660, onde homens cultos colocavam em discussão problemas científicos e planejavam experiências. Entre os problemas discutidos exaustivamente por Wren, Halley e Hooke estava a questão de que lei da atração podia fazer os planetas seguirem órbitas elípticas em torno do Sol. Por volta de 1684, Halley acreditava piamente que a força atrativa diminuía com o quadrado da distância (isto é, quando a distância era duplicada, a força seria reduzida a um quarto do seu valor original). Esta parecia constituir uma suposição razoável, levando-se em conta ser um fato bem conhecido que a luz se comporta desta forma; além disso, se qualquer influência se espalha simetricamente em todas as direções a partir de uma fonte, a área sobre a qual ela se espalha aumenta com o quadrado da distância, e assim, é mais provável que sua força decline em proporção com a área sobre a qual ela se espalha. Halley e os outros não foram capazes, entretanto, de provar esta afirmativa através de uma demonstração matemática de que, a partir de tal lei da atração, resultariam órbitas elípticas.

Em agosto daquele ano, Halley foi a Cambridge para consultar Isaac Newton (1642-1727), o professor lucasiano de Matemáticas. Quando perguntou a Newton qual seria a órbita seguida por um planeta influenciado por uma força de atração inversamente quadrada em direção ao Sol, Newton imediatamente replicou que seria uma elipse e que provara isto algum tempo antes. Newton havia perdido seus cálculos, mas prometeu repeti-los e enviá-los a Halley, o que fez, alguns meses mais tarde. Este encontro reacendeu o interesse de Newton pela gravitação e pelo movimento planetário. Graças ao constante encorajamento de Halley, Newton foi persuadido a reunir seu trabalho no trata-

do *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* o qual, publicado em 1687, tornou-se um dos mais fundamentais e influentes livros jamais escritos.

As pesquisas de Newton sobre a gravidade começaram realmente em 1665. Havia regressado à sua casa em Woolsthorpe, perto de Grantham, em Lincolnshire, porque a Universidade de Cambridge fora fechada em virtude da Grande Peste. Diz-se – e talvez seja mesmo verdade – que, ao observar a queda de uma maçã no jardim, ele foi levado a considerar se a força que fazia a maçã cair podia ser a mesma força que mantinha a Lua em sua órbita ao redor da Terra. Começou a investigar o assunto.

Newton decidiu (como faria Huygens, independentemente, alguns anos depois) que um corpo em movimento percorrendo uma trajetória circular deve estar sujeito a uma aceleração constante devido a uma força constante atuando em direção ao centro do círculo (Fig. 10) Um corpo que se mova em um círculo estava continuamente "caindo" em direção ao centro mas, em virtude de sua velocidade "tangencial" nunca se aproximando nem se afastando daquele centro. Graças à Terceira Lei do Movimento Planetário, de Kepler, sabia-se como estavam relacionados o período orbital e a distância de um planeta ao Sol. Combinando esta informação com sua fórmula para o movimento circular, Newton descobriu que a força responsável pela manutenção dos planetas em sua órbita (assumindo órbitas circulares) era inversamente proporcional a suas distâncias ao Sol. Resolveu verificar se as forças que impediam a queda da Lua e faziam a maçã cair eram dois aspectos da mesma força comparando a aceleração da Lua em sua órbita e da maçã em sua queda, supondo-se que a força responsável fosse uma força inversamente quadrada.

Deduziu que a importante distância a ser considerada era a que existia a partir do centro da Terra e não a partir de sua superfície, embora não pudesse provar esta assertiva a não ser muito tempo depois. Sabendo que a distância da Lua é cerca de 60 vezes o raio da Terra e sabendo o período de tempo que a Lua leva para viajar ao redor da Terra, tratava-se de um assunto relativamente fácil calcular a aceleração da Lua em relação a Terra, isto é, a distância através da qual ela "cai" cada segundo ou cada minuto. A aceleração de um corpo em queda livre próximo da superfície da Terra era conhecida de forma experimental. Se a Lua estava 60 vezes mais distante do centro da Terra do que a maçã, esta última devia estar sujeita a uma aceleração devida à

gravidade de 60 × 60 (3.600) vezes maior do que aquela experimentada pela Lua. Em um segundo, portanto, a maçã cairia através de uma distância igual àquela através da qual a Lua cairia em um minuto.*

Newton fez a comparação e verificou que as duas velocidades "correspondiam quase exatamente". De fato, o cálculo original de Newton sugeriu que a aceleração da maçã era mais de 4.000 vezes maior do que a da Lua, mas esta discrepância mostrou-se devida principalmente ao valor impreciso do raio da Terra disponível naquela época. Quando repetiu os cálculos em 1684 usou valores mais adequados e quando os resultados foram publicados nos *Principia* a margem de erro era menor do que 1 por cento.

Isto sugeriu fortemente a Newton que a mesma força que controlava o movimento dos planetas ao redor do Sol governava o movimento da Lua e a queda dos objetos ao solo – a força conhecida comumente pelo nome de gravidade.

Antes de poder desenvolver a teoria ele precisava desenvolver o necessário instrumento matemático, o ramo das matemáticas conhecido como cálculo. O cálculo foi desenvolvido independentemente e de forma mais conveniente pelo matemático alemão Gottfried Leibniz (1646-1716) e existe certa polêmica internacional a respeito de quem merece o crédito pela sua criação. Por volta de 1679 Newton demonstrara que órbitas elípticas poderiam resultar de um movimento sujeito a uma força inversamente quadrada dirigida em direção a um dos focos da elipse mas só em 1685, com a ajuda de seus cálculos, foi capaz de provar que era permissível tratar a atração gravitacional da Terra como se toda sua massa estivesse concentrada em um ponto situado em seu centro. Quando isto foi demonstrado, ele pelo menos justificara a maneira pela qual fizera sua comparação entre as acelerações da Lua e da maçã.

Seus *Principia* apareceram em três partes: Livro I, estabelecendo os princípios gerais do sistema de mecânica de Newton; Livro II, abordando outros aspectos da física; e Livro III, "O Sistema do Mundo", abrangendo a aplicação de suas leis ao Universo. O Livro I continha suas três leis do movimento, as quais ainda hoje apresentam fundamental importância. Na linguagem moderna, são as seguintes:

* Embora a aceleração da maçã seja 3.600 vezes maior do que a experimentada pela Lua, a lei da queda livre estabelecida por Galileu mostrou que a distância percorrida era proporcional ao grau de aceleração e ao tempo *marcado*.

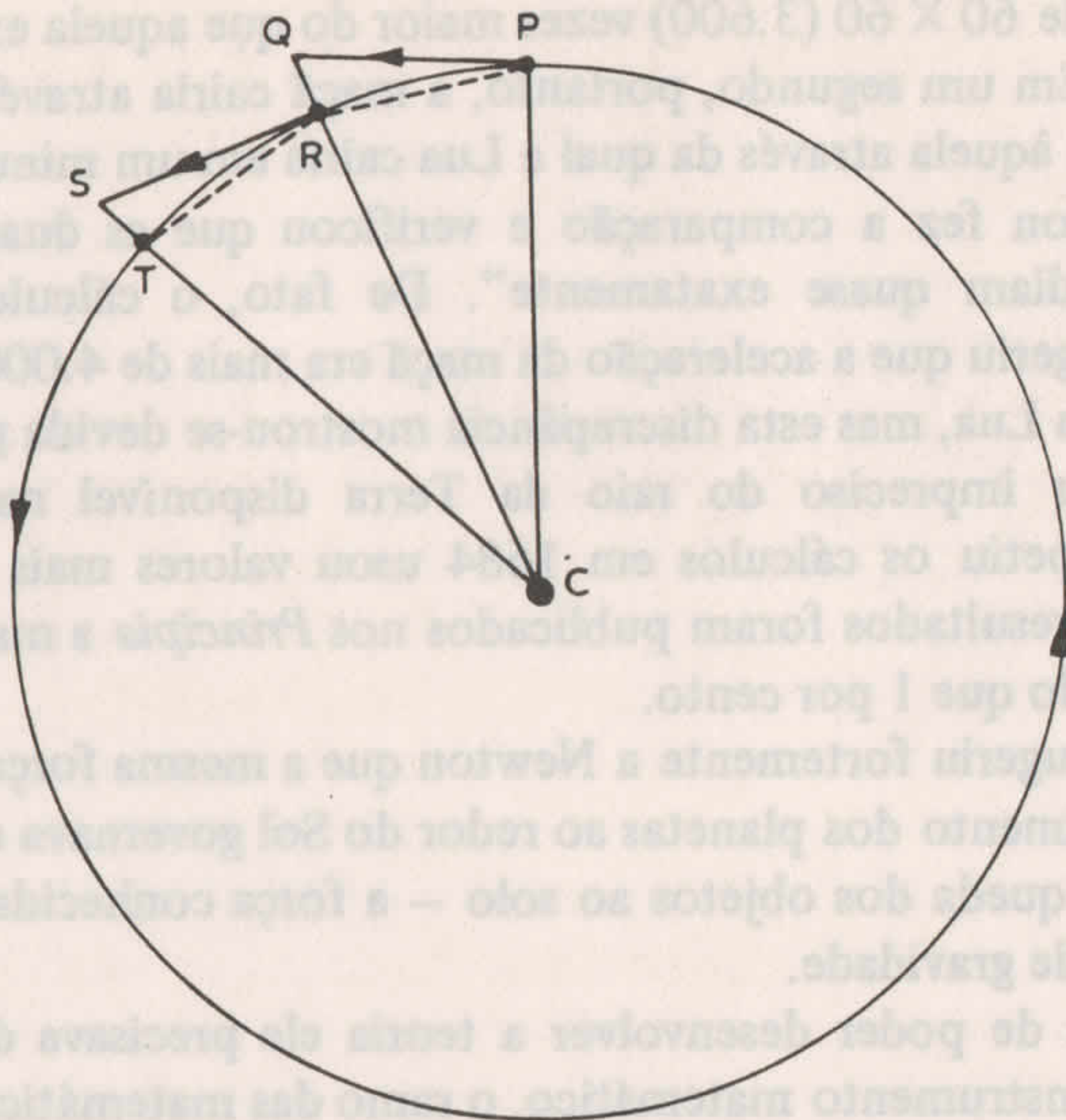



Fig. 10 Movimento circular. *Imaginemos um corpo percorrendo uma órbita circular sob a influência de uma força de atração dirigida para o centro do círculo (uma "força central"). No ponto P o corpo estará se movendo na direção PQ e, se a força atrativa for retirada, ele continuará a se mover naquela direção em velocidade constante de acordo com a primeira lei de Newton. No tempo que o corpo levaria para atingir o ponto Q, ele terá "caído" sob a ação da força central uma distância QR até o ponto R no círculo. No ponto R o corpo estará se movendo na direção RS, mas o efeito da força de atração o levará, ao invés, ao ponto T. Assim sendo, um corpo que esteja percorrendo uma trajetória circular está continuamente caindo em direção ao centro, mas jamais se aproximando dele. Newton aplicou esta linha de raciocínio ao movimento da Lua.*

Primeira lei: Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta a menos que influenciado por uma força;

Segunda lei: A alteração do movimento é proporcional à força e tem lugar na direção na qual a força está agindo, isto é, a aceleração a produzida em um corpo de massa m por uma força F está relacionada com a expressão $F = m \times a$ (força = massa × aceleração);

Terceira lei: Para cada ação existe uma reação igual e oposta (por exemplo, se você empurra uma parede, a parede empurra contra você com força igual e oposta).

A primeira e a segunda leis finalmente sepultaram a doutrina aristotélica de força e movimento. Nos termos mais claros possíveis, Newton afirmou que a força não era necessária para manter o movimento, que o estado natural dos corpos era o repouso ou o movimento uniforme em linha reta e que a força só era necessária para mudar um estado de movimento. O trabalho de Newton estabeleceu os conceitos de força, massa e inércia (resistência à aceleração) da forma como usamos estes termos hoje. Admirava consideravelmente Galileu como o "pai" das duas primeiras leis, mas sua admiração foi demasiado generosa. Embora Galileu se aproximasse bastante da lei da inércia, a primeira lei de Newton, não aceitou a idéia de um movimento indefinido em uma linha reta e, embora tivesse estabelecido os alicerces para a segunda lei com seu trabalho a aceleração dos corpos em queda livre, de forma alguma chegou a algo que se assemelhasse à enunciação desta lei.

No Livro III Newton demonstrou que o movimento de um corpo seguindo uma órbita cônica (circular, elíptica, parabólica ou hiperbólica) exigia a ação de uma força inversamente quadrada dirigida para um ponto fixo e mostrou, por outro lado, que um corpo que se mova sob a ação de uma força inversamente quadrada obedeceria as leis de Kepler. Assinalou que a mesma força explicava o movimento da Lua, o movimento dos planetas, a aceleração dos corpos em queda livre, os movimentos dos satélites de Júpiter e as marés dos oceanos.

Uma vez que sobre a Terra todos os corpos caem com igual aceleração, seja qual for sua massa, deduz-se claramente da segunda lei de Newton que para isto a força atuante sobre o corpo em queda livre deve ser proporcional à massa do corpo, isto é, quanto mais massa ele tiver, maior a força necessária para acelerá-lo de uma dada quantidade ($a = F/m$ e sendo assim, para a ser constante para todas as massas, então F deve ser proporcional a m; uma massa de duas toneladas exige duas vezes mais força do que uma massa de uma tonelada para atingir a mesma aceleração). Pela terceira lei seguia-se que se uma massa m era influenciada por outra massa M, então uma força de atração igual e oposta seria exercida por m sobre M (por exemplo, se a Terra atrai a

Lua, assim a Lua deve atrair a Terra). Por conseguinte, a força mútua de atração deve depender das massas de ambos os corpos.

Assim ficou estabelecido que a gravitação era uma força de atração proporcional às massas dos corpos que se atraem e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles. Para as massas m e M separadas pela distância r a força da gravidade é dada pela expressão $F = GmM/r^2$, onde G é uma constante de proporcionalidade conhecida como a constante gravitacional universal. O valor de G determina a intensidade da força da gravidade. É uma dentre numerosas constantes fundamentais da natureza, números cujos valores determinam o comportamento do Universo e de tudo que ele contém. Se G é ou não constante em todos os momentos é assunto para muito debate, como veremos no Capítulo 12.

O termo "massa", tal como aparece na segunda lei de Newton, é a massa inercial, a medida da resistência de um corpo a qualquer alteração em seu estado de movimento. Quando a mesma força é aplicada a dois corpos de massas diferentes, então o que contém menos massa adquirirá maior aceleração do que aquele que possui mais massa (empurrar um carrinho de mão é mais fácil do que empurrar um ônibus). Entretanto, o termo "massa", tal como aparece na lei da gravitação universal de Newton, é a "massa gravitacional", a medida do que pode se chamar a "quantidade de gravidade" possuída por um corpo. Não existe nenhuma razão óbvia pela qual as duas "massas" devam ser idênticas. Afinal de contas, podemos encarar a massa gravitacional como o equivalente gravitacional da carga elétrica; dois corpos da mesma massa inercial podem ter cargas elétricas muito diferentes e serão aceleradas de forma diferente sob a influência de um campo elétrico. O fato de que todos os corpos sob o campo gravitacional da Terra caiam com a mesma aceleração só é possível quando a relação entre a massa gravitacional (a qual está envolvida na determinação da força de aceleração) e a massa inercial (a qual determina a resistência à aceleração) é precisamente a mesma para todos eles. Newton realizou experiências para verificar se existia alguma diferença nesta relação em se tratando de diferentes tipos de corpos. Não encontrou nenhuma, nem se verificou qualquer diferença desde a sua época – mesmo em experiências capazes de distinguir uma diferença de uma parte em 1 bilhão. Uma vez que as duas massas estejam sempre na mesma proporção, foram escolhidas unidades de medida para torná-las iguais. O fato das massas inercial e gravitacional serem iguais é conhecido como o *princípio da equivalência*.

Como veremos no Capítulo 5, este princípio constitui um dos fundamentos básicos da Teoria Geral da Relatividade.

Êxitos da teoria de Newton

ALÉM DE SEU sucesso em explicar os corpos em queda livre e os movimentos planetários, a teoria de Newton teve grande êxito igualmente sob outros aspectos.

As marés do oceano eram explicadas, em termos gerais, como um fato devido à *diferença* de atração exercida pela Lua sobre o globo sólido da Terra e as massas oceânicas em lados opostos de nosso planeta, sendo o resultado prático a elevação da água nos lados voltados para a Lua ou opostos a ela.

Newton previu que, em virtude de sua rotação, a Terra devia ser mais dilatada ao nível do equador e ser achatada ao nível dos pólos e mostrou como este afastamento da Terra da imagem da esfera perfeita contribuía para o fenômeno da precessão, cujos efeitos foram descobertos pela primeira vez cerca de 2.000 anos atrás pelo astrônomo grego Hiparco. A precessão é o fenômeno pelo qual o eixo da Terra se desvia lentamente de sua posição de tal forma que o pólo celestial descreve um círculo no céu. Se a Terra fosse uma perfeita esfera isto não aconteceria, mas a atração gravitacional do Sol e da Lua sobre a distensão equatorial faz o eixo da Terra mover-se em círculo tal como o topo de um pião faz quando deslocado da vertical.

Edmund Halley, grande apoiador de Newton, estudou o aparecimento dos cometas dos anos 1456, 1531, 1607 e 1682 e chegou à conclusão de que eles compartilhavam a mesma trajetória elíptica, sendo a ligeira discrepância nos intervalos entre os retornos sucessivos devida às influências perturbadoras dos planetas sobre a trajetória do cometa. Predisse, usando as leis newtonianas, que o cometa voltaria em 1758. Quando esta predição se cumpriu o cometa recebeu seu nome, embora ele já tivesse morrido havia muito tempo.

Os difíceis problemas das perturbações dos planetas devido às suas mútuas atrações gravitacionais foram abordados, especialmente por matemáticos franceses e alemães e, por volta do final do século XVIII, a ciência da mecânica celestial, baseada nas leis do movimento e da gravitação de Newton, havia resolvido com sucesso muitos problemas complexos relativos ao movimento observado no Sistema Solar. Um impor-

Sir Isaac Newton (1642–1727), o matemático e físico inglês que tem sido considerado a maior figura científica na história. Mais conhecido por suas formulações das leis do movimento e da gravitação universal, fez notáveis contribuições a muitos ramos da ciência, entre os quais a óptica. (BBC Hulton Picture Library.)

Albert Einstein (1879–1955), cujas Teorias Especial e Geral da Relatividade mudaram inteiramente a nossa concepção da natureza do espaço, do tempo e da gravitação. (BBC Hulton Picture Library.)

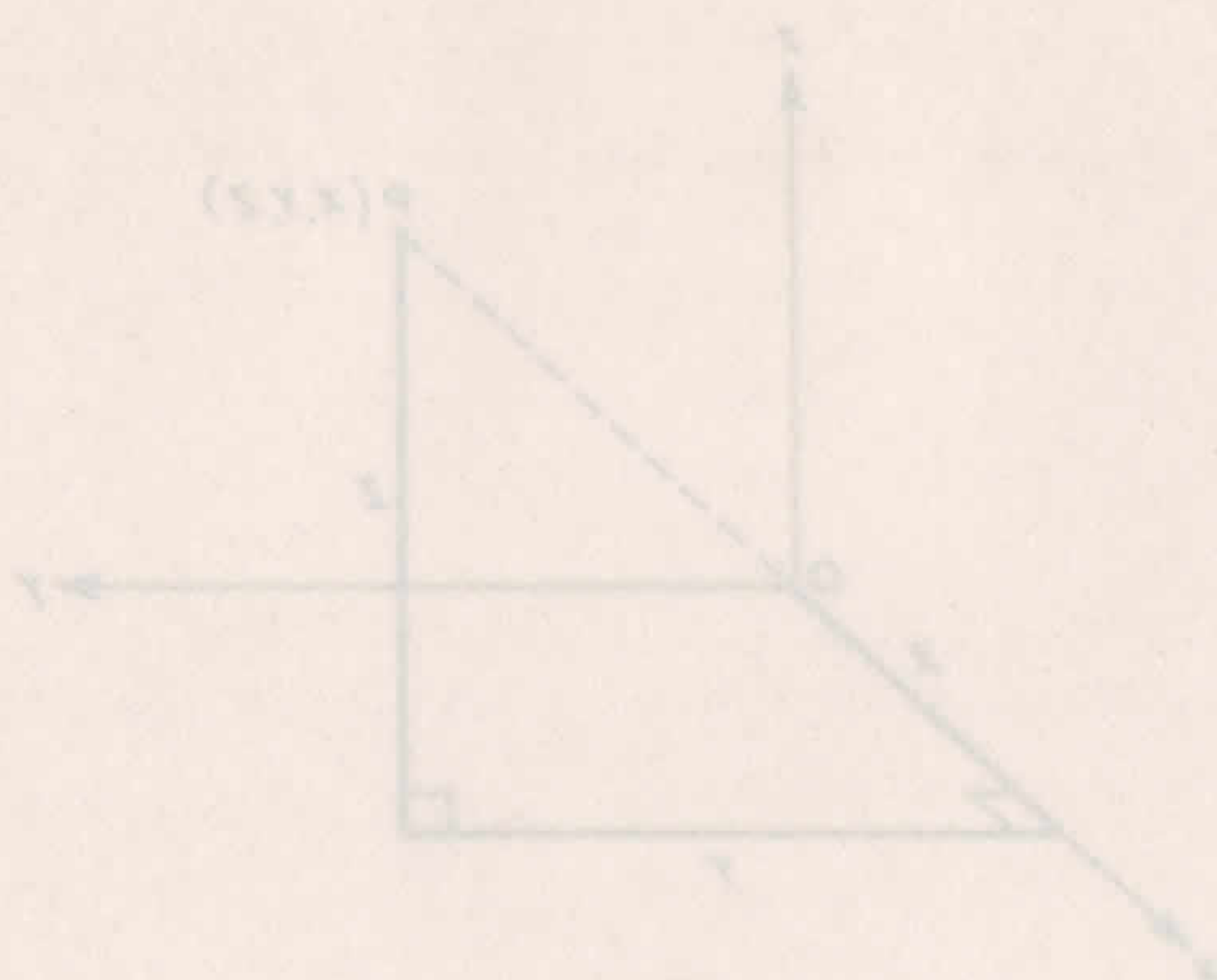
tante triunfo da mecânica celestial adviria da bem-sucedida previsão da posição de um novo planeta além da órbita de Urano. Os cálculos, realizados independentemente na Inglaterra por J. C. Adams (1819-1892) e na França por U. Leverrier (1811-1877) basearam-se nas perturbações da órbita de Urano pelo até então não detectado planeta Netuno, como veio a ser chamado, ao ser descoberto em 1846 por Galle e d'Arrest do Observatório de Berlim.

As observações publicadas em 1803 por William Herschel (1738-1822), que descobrira em 1781 o planeta Urano, demonstrara que numerosas estrelas, entre as quais Castor (uma das duas estrelas brilhantes da constelação de Gêmeos) consistia de duas estrelas que gravitavam lentamente uma ao redor da outra sob suas mútuas atrações: tais pares de estrelas se movem de acordo com as leis de Kepler e as previsões da gravitação newtoniana. Antes do século XIX ter chegado a sua metade, a teoria da gravidade, de Newton, demonstrara funcionar através de todo o Universo conhecido.

A gravitação newtoniana era realmente uma força *universal*. Com a aceitação da teoria newtoniana chegaram ao fim aquelas idéias profundamente arraigadas da época dos gregos e dos tempos medievais de que havia uma lei para o firmamento e outra para os objetos sobre a Terra. Estava aberta a porta para o desenvolvimento de uma abordagem científica para compreender o Universo e todos os seus componentes nos termos de algumas leis básicas e forças que operavam da mesma forma sobre a Terra, no laboratório e no cosmos.

Somente um aspecto da teoria parecia ser insatisfatório: a gravitação newtoniana era uma força de atração que agia através de vastas distâncias no Universo. Entretanto, a *natureza* desta força permanecia um mistério, foi com base neste fato que a teoria foi criticada inicialmente, particularmente na Europa continental, onde a tradição de filósofos mecanicistas como Descartes era forte — forças misteriosas que agiam através do espaço vazio não tinham lugar em tal filosofia. O próprio Newton recusou-se a especular sobre a natureza real da força gravitacional. O importante era que sua teoria funcionava e logo veio a ser amplamente aceita, mesmo por aqueles que criticavam acentuadamente o conceito de uma força que podia "agir à distância através do espaço vazio".

Cerca de dois séculos teriam de se passar antes do surgimento de uma teoria alternativa capaz de desafiar e superar a gravitação newtoniana. Esta nova teoria foi a Relatividade, cujo desenvolvimento é dis-

cutido nos próximos dois capítulos. É uma teoria superior à de Newton apenas em circunstâncias extremas, uma teoria que modifica e amplia a teoria newtoniana ao invés de substituí-la totalmente. Ademais, a medida da grande realização de Newton é que mesmo hoje a mecânica newtoniana continua sendo extremamente adequada para lidar com todos os problemas, a não ser os mais esotéricos. Quando se deseja enviar um homem à Lua, ou uma sonda espacial aos planetas mais exteriores, as teorias da força, do movimento e da gravitação publicadas por aquele notável gênio científico em 1687 são as mais adequadas para lidar com o problema.

4
Reviravolta

AS LEIS DA MECÂNICA newtoniana são válidas para todos os observadores que se acham em movimento relativo uniforme. O que significa esta frase? Ao realizar experiências e observações dos eventos necessitamos de um referencial, um padrão de medida de posição e tempo em relação ao qual avaliar a posição e o tempo de cada evento particular. Geralmente consideramos que o espaço tem três dimensões e os objetos contidos no espaço como possuidores de "comprimento", "largura" e "altura", correspondendo às três direções no espaço, "ao longo", "através" e "para cima". Nas lendas de tesouros escondidos, o butim do pirata pode ser encontrado com a ajuda de um mapa adquirido fortuitamente que recomenda seu portador a começar em um determinado ponto, caminhar X passos para o norte, Y passos para o leste e então subir uma altura Z. Desta forma, as coordenadas espaciais do tesouro (ou de qualquer ponto) podem ser descritas (Fig. 11).

O tempo de um acontecimento pode ser determinado com referência a um relógio, e um aspecto fundamental da filosofia de Newton era de que existia o *tempo absoluto* no Universo. Em suas próprias palavras, descritas nos *Principia*, "o tempo é absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui sempre igual sem relação com nada de externo. . ." em outras palavras, o tempo fluía para o passado em velocidade uniforme, passando de um instante de tempo

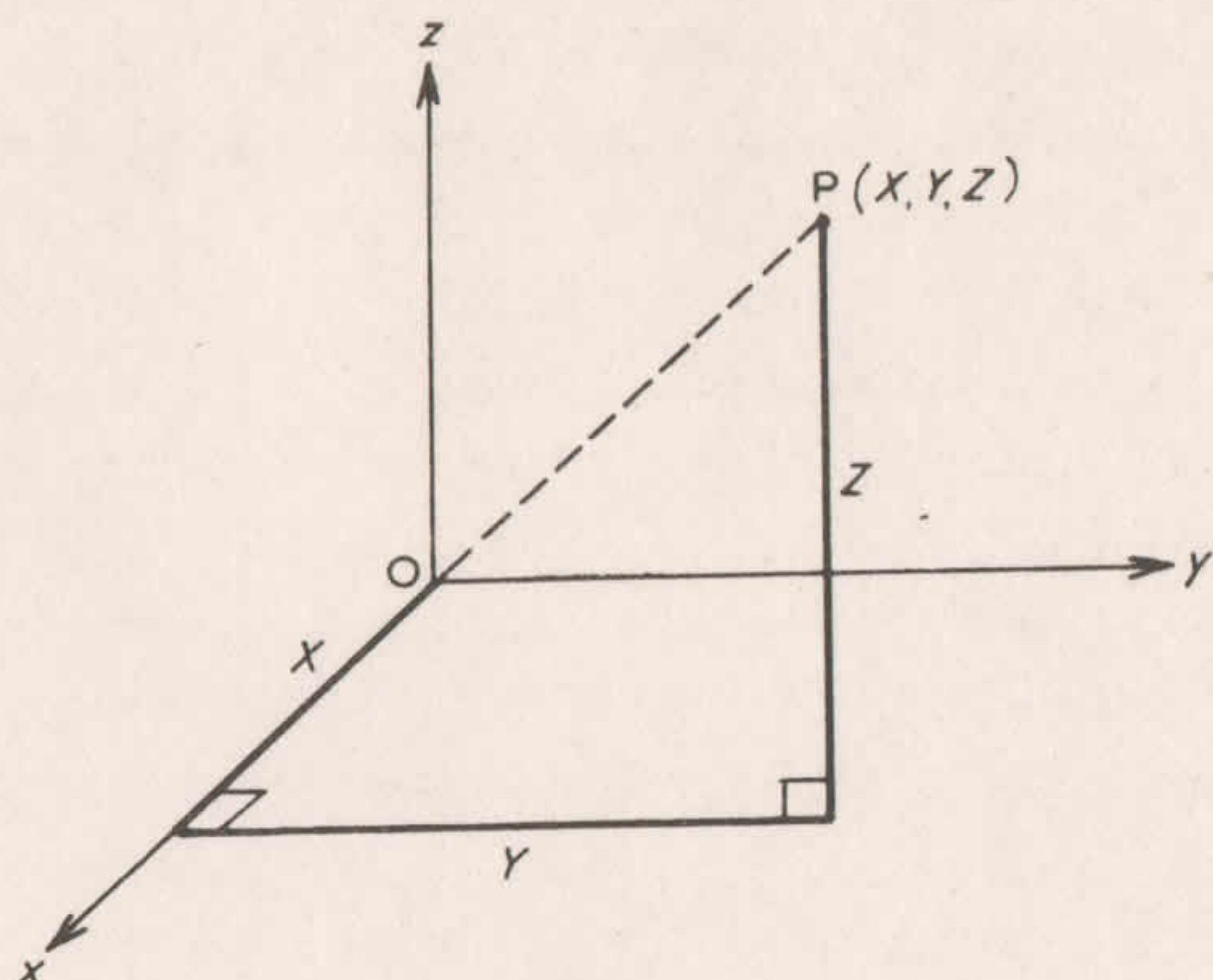



Fig. 11 Coordenadas no espaço. *A posição do ponto P em relação ao observador situado em O é especificado com referência a três eixos mutuamente perpendiculares definindo a direção* x *("ao longo"), a direção* y *("através") e a direção* z *("para cima").*

absoluto para o próximo, independentemente do que estivesse acontecendo no Universo. Para um observador, o tempo manteria seu fluxo contínuo e incansável, onde quer que ele estivesse localizado e qualquer que fosse a velocidade com a qual se movesse. Esta ainda é a visão do tempo produzida pelo "bom senso" de hoje; uma hora ainda é uma hora esteja você sentado em uma cadeira de balanço ou atravessando o Atlântico em um avião supersônico.

Um referencial, portanto, pode ser considerado como um meio rigidamente definido de medir a posição e o tempo (por exemplo, três réguas colocadas em ângulos igualmente retos para medir posição e um relógio para medir o tempo). Um referencial *inercial* precisa estar isento de aceleração ou rotação. Um observador localizado em tal esquema de referência – isto é, um observador que se acha estacionário ou se movendo em movimento uniforme em linha reta – é denominado um observador inercial. É fácil compreender que dois observadores em movimento uniforme *relativo* acharão verdadeiras as leis da mecânica newtoniana em ambos os seus referenciais. Consideremos, por exemplo, um observador que esteja de pé ao lado de uma ferrovia, enquanto o outro está localizado dentro de um trem em alta velocidade viajando em movimento uniforme. Se o observador situado no trem atira uma bola

ao longo do corredor em velocidade uniforme, o observador estacionário também verá aquela bola se movendo em velocidade uniforme; supostamente, a velocidade que ele medirá será maior (sendo a velocidade da bola mais a velocidade do trem) mas a bola estará se deslocando de acordo com a primeira lei do movimento, de Newton, em relação a ambos os referenciais. Da mesma forma, se o observador em movimento deixa cair a bola ele medirá a mesma taxa de aceleração (devida à força gravitacional exercida pela Terra) que mediria o observador estacionário se tivesse deixado cair a bola. Assim sendo, a segunda lei (força = massa × aceleração) também é obedecida em relação a ambos os referenciais. Igualmente, a terceira lei será a mesma para ambos os observadores. São dois os problemas aí envolvidos: que há de tão especial a respeito dos referenciais inerciais? Em relação a que pode alguém avaliar se um referencial é ou não inercial? Um referencial inercial é aquele que está em repouso ou em movimento retilíneo uniforme (de acordo com Newton), mas em repouso ou em movimento uniforme em relação a quê? A resposta de Newton era "espaço absoluto". Em suas próprias palavras: "O espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com nada de externo, permanece sempre similar e inamovível". O espaço absoluto era uma característica fundamental do Universo, um padrão absoluto de repouso em relação ao qual, em princípio, se não na prática, seria possível determinar o movimento absoluto de um corpo, de um "lugar absoluto" a outro. O espaço absoluto era indiferente ao movimento retilíneo uniforme, mas resistia à aceleração dos corpos. A inércia dos corpos, segundo Newton, surgiu por causa da ação do espaço absoluto.

Foram levantadas objeções aos conceitos de espaço absoluto e tempo absoluto por contemporâneos e quase contemporâneos de Newton, tais como Leibniz e Bishop Berkeley, uma vez que atribuíam ao espaço e ao tempo uma existência física em si mesmos. O ponto de vista alternativo, defendido por Leibniz, era a teoria *relacional* do espaço e do tempo, segundo a qual o "espaço" era simplesmente a separação entre os corpos e "tempo" era simplesmente a sucessão dos eventos; de acordo com este ponto de vista, nem o espaço e nem o tempo possuíam uma existência independente por si mesmos e os movimentos relativos eram tudo que importava.

O espaço absoluto tinha a propriedade de agir sobre os corpos (resistir a sua aceleração) mas não era afetado pela matéria. A este respeito, Einstein observou mais tarde: "Está em conflito com a com-

preensão científica de alguém conceber uma coisa que age, mas sobre a qual nada pode agir". Newton tentou identificar o espaço absoluto — o padrão absoluto de repouso — com o centro de massa do Sistema Solar; mais tarde os comentaristas o associaram com o referencial definido pelas "estrelas fixas"; e, em termos modernos, a identificação lógica seria com o referencial em relação ao qual as galáxias distantes parecem se afastar uniformemente uma das outras.

Ernst Mach (1838-1916), em 1872, argumentou que a propriedade da inércia nada tinha a ver com o espaço absoluto, como tal, mas surgia de uma espécie de interação "inespecífica" entre cada corpo isolado e todas as outras massas do Universo. Não existissem outras massas, afirmava Mach, e um corpo isolado não teria inércia; isto contrastava com a opinião de Newton de que o corpo ainda assim possuiria a inércia em virtude do efeito do espaço absoluto. As opiniões expressas por Mach impressionaram grandemente Einstein, que cunhou o termo *princípio de Mach* para descrever a hipótese.

Durante o século XIX grandes progressos foram obtidos no estudo da eletricidade e do magnetismo. Fenômenos elétricos tais como faíscas, relâmpagos e o comportamento do frasco de Leyden (que armazenava eletricidade) foram a princípio encarados como diferentes dos fenômenos magnéticos, os quais estavam associados ao comportamento de certas espécies de rochas, agulhas de bússola e coisas similares. Entretanto, o filósofo natural dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) e o físico francês André Marie Ampère (1775-1836) mostraram através de experiências que uma corrente elétrica em movimento através de um fio dá origem a um efeito magnético que desvia as agulhas das bússolas. Poucos anos mais tarde, em 1831, o grande experimentador

λ

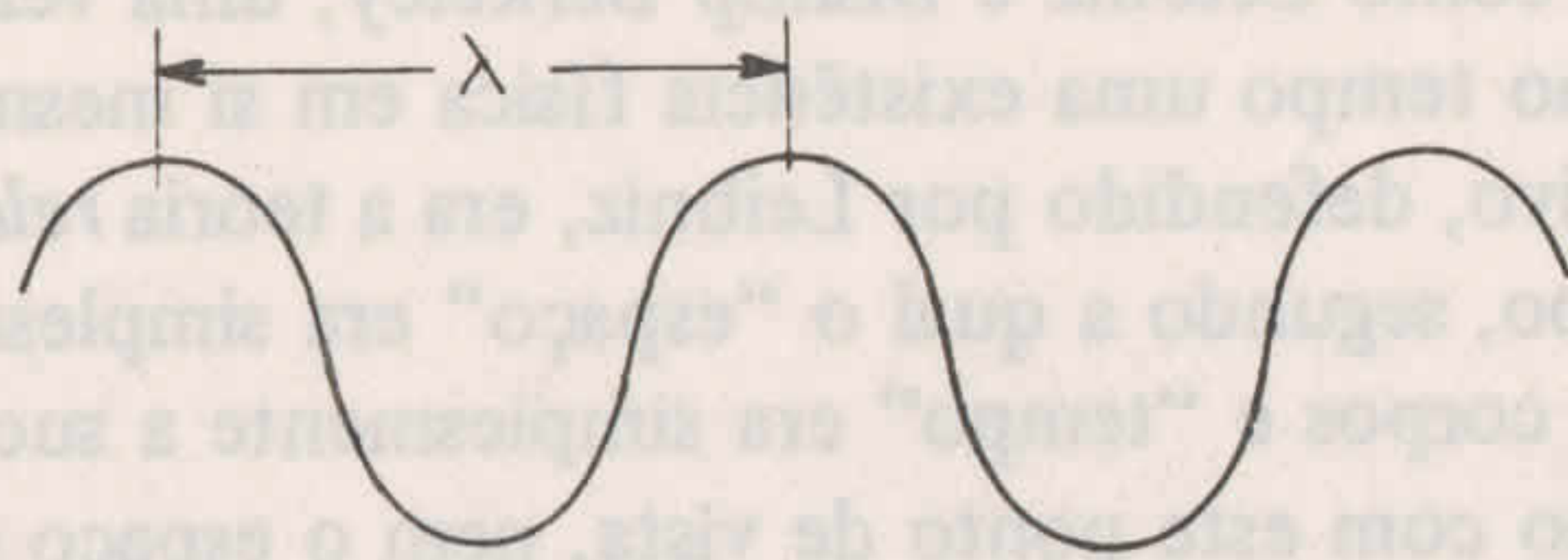



Fig. 12 Uma onda luminosa. *Uma onda luminosa é visualizada como uma onda sobre a água. A distância entre duas cristas define o comprimento da onda, indicado convencionalmente pelo símbolo λ; o número de cristas no segundo é a freqüência.*

inglês Michael Faraday (1791-1867) demonstrou, inversamente, que um ímã em movimento produz uma corrente elétrica em um fio.

A eletricidade e o magnetismo foram reunidos com sucesso na teoria eletromagnética do notável matemático e físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879). Seguindo uma antiga sugestão de Faraday, desenvolveu o conceito de *campo*. Considerou toda partícula rodeada de um campo, uma aura invisível que agia sobre outras partículas carregadas colocadas dentro dele, isto é, o campo de uma partícula carregada exercia uma força sobre outra partícula carregada. Esta idéia era notavelmente diferente do conceito de gravitação newtoniana, segundo o qual ela era encarada como uma força que agia entre uma massa e outra através de uma distância. Na teoria de Maxwell era a intensidade do

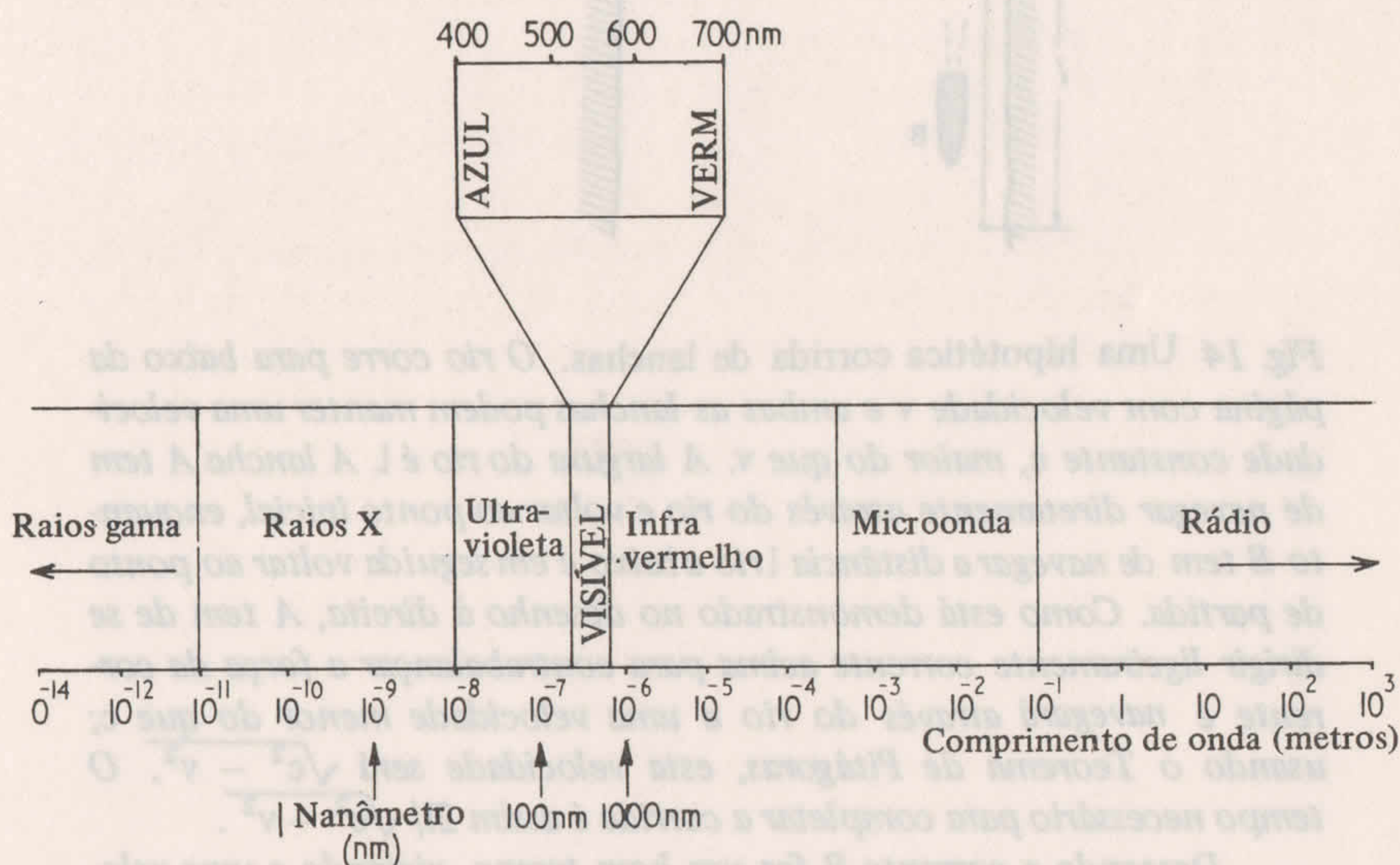



Fig. 13 Espectro eletromagnético. *O conjunto completo de possíveis comprimentos de onda associados às ondas eletromagnéticas, dividido até certo ponto arbitrariamente em numerosas faixas, variando dos raios gama, de comprimento de onda mais curto, até as ondas de rádio, de comprimento mais longo. A luz visível partilha uma estreita faixa de comprimento de onda com cerca de 400 nanômetros (1 nm é um bilionésimo de metro) até cerca de 700 nanômetros. As diferentes cores correspondem a diferentes comprimentos de onda.*

campo em um determinado ponto que afetava o movimento de uma partícula colocada naquele ponto.

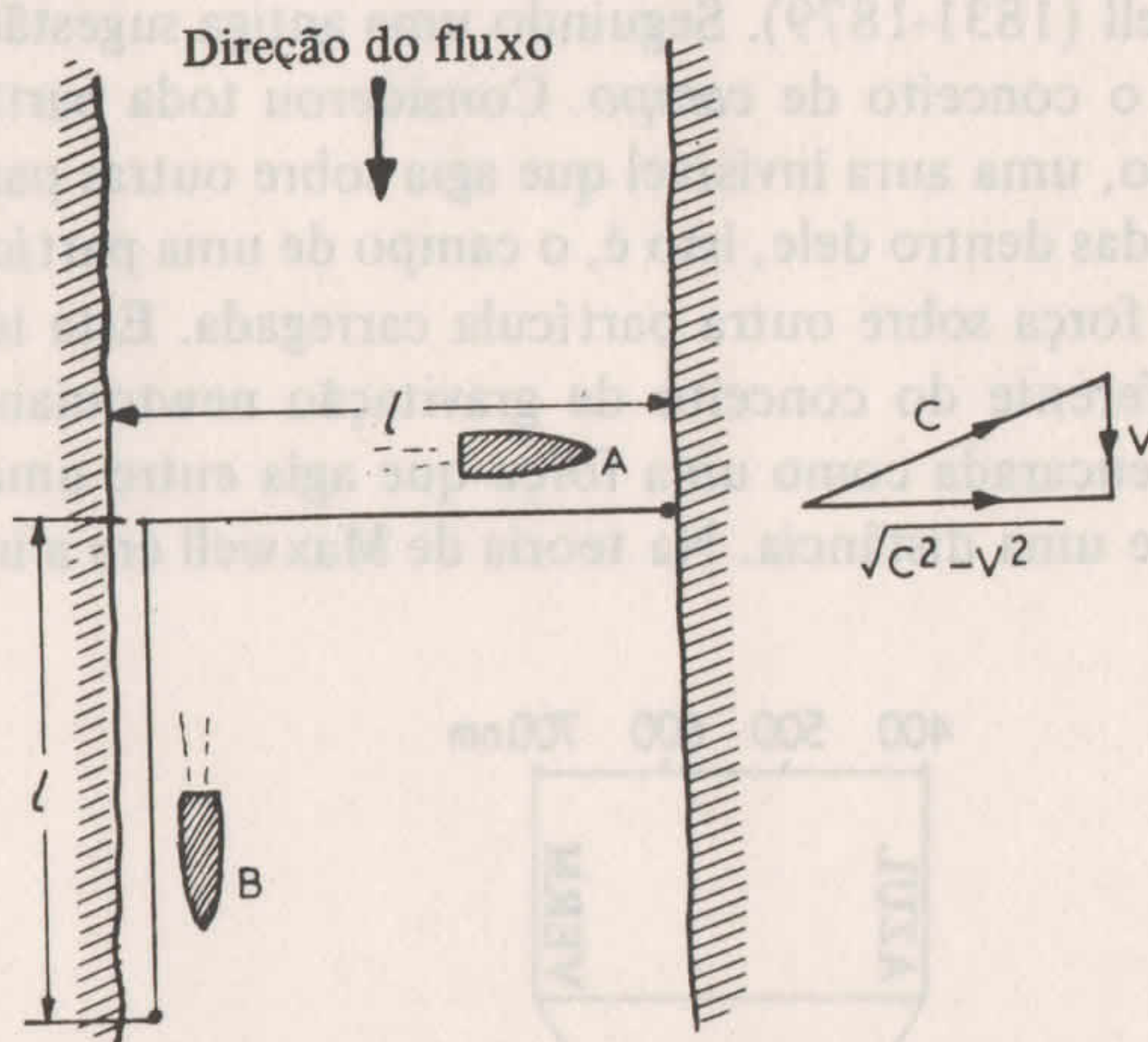



Fig. 14 Uma hipotética corrida de lanchas. *O rio corre para baixo da página com velocidade* v *e ambas as lanchas podem manter uma velocidade constante* c, *maior do que* v. *A largura do rio é* l. *A lancha A tem de navegar diretamente através do rio e voltar ao ponto inicial, enquanto B tem de navegar a distância* l *rio abaixo e em seguida voltar ao ponto de partida. Como está demonstrado no desenho à direita, A tem de se dirigir ligeiramente corrente acima para contrabalançar a força da corrente e navegará através do rio a uma velocidade menor do que* c; *usando o Teorema de Pitágoras, esta velocidade será* $\sqrt{c^2 - v^2}$. *O tempo necessário para completar a corrida é assim* $2l/\sqrt{c^2 - v^2}$.

Descendo a corrente B faz um bom tempo, viajando a uma velocidade c + v *uma vez que a corrente está a seu favor; mas contra a corrente sua velocidade será* c – v. *O tempo necessário para B será* $l/(c + v) + (c - v)$ *que, em álgebra elementar, se transforma em* $2lc/(c^2 - v^2)$.

Dividindo o tempo de A pelo tempo de B chegamos a $\sqrt{1 - v^2/c^2}$, *que deve* sempre *ser menor do que 1, a menos que* v= 0 *(isto é, a menos que o rio não tenha corrente). Por isso A* sempre *ganha a corrida.*

Na discussão da experiência de Michelson-Morley, c *indica a velocidade da luz e* v *a velocidade do éter em relação à Terra.*

As equações de Maxwell descrevendo o campo eletromagnético previam que o movimento das partículas carregadas deveriam gerar ondas – ondas eletromagnéticas – que viajariam através do espaço com uma velocidade supostamente igual à velocidade da luz, ou seja, 300.000 km por segundo. Além disso, estas ondas podiam ter qualquer comprimento de onda (distância entre sucessivas cristas de ondas; veja Fig. 12): embora as ondas de luz sejam uma forma de onda eletromagnética, certamente podem existir ondas de maior ou menor comprimento de onda. Heinrich Hertz (1857-1894) conseguiu, em 1888, transmitir e receber ondas com muito maior comprimento – as ondas de rádio. Hoje estamos familiarizados com comprimentos de onda que vão de menos de 1 bilionésimo de metro até muitos quilômetros e dividimos este *espectro eletromagnético* (Fig. 13) em faixas arbitrárias conhecidas como raios gama, raios X, raios ultravioleta, luz visível, raios infravermelhos, microondas e radiação. Todas essas radiações viajam através do espaço à velocidade da luz (cerca de 300.000 km por segundo) e são todas da mesma natureza.

As ondas sonoras propagam-se no ar, as ondas aquáticas na água. É difícil conceber uma onda sem alguma espécie de meio dentro do qual ela se propaga. Da mesma forma, Maxwell ressuscitou a antiga idéia de um éter, enchendo todo o espaço, que servia como o veículo para estas ondas. O referencial definido pelo éter estacionário veio a ser encarado como o padrão absoluto de repouso e acabou identificado, nas mentes dos físicos, com o espaço absoluto de Newton.

Foram realizadas experiências para tentar medir a velocidade da Terra em relação ao éter. A mais famosa destas experiências foi a de Michelson-Morley, realizada pela primeira vez em 1881 pelo físico norte-americano Albert Michelson (1852-1931) e, em 1887, com aparelhagem aperfeiçoada, por ele e Edward Morley (1838-1923). O princípio da experiência pode ser ilustrado pela seguinte analogia: imaginemos uma corrida entre duas lanchas, cada uma delas capaz de atingir exatamente a mesma velocidade, em um rio correndo em movimento uniforme. O barco A tem de atravessar o rio até a margem oposta e em seguida retornar à posição inicial, enquanto o barco B tem de percorrer uma distância igual corrente abaixo e em seguida voltar contra a corrente. Qual dos barcos ganhará a corrida? Tal como está explicado na Fig. 14, o barco A ganhará sempre.

O argumento que defende o éter funciona da seguinte maneira: se a Terra está se movendo através do éter, então de nosso ponto de vis-

ta o éter parecerá estar fluindo para trás, tal como a corrente no exemplo anterior. Se a luz se move através do éter em velocidade constante (como sugerem as equações de Maxwell), um raio de luz enviado na direção do movimento da Terra e em seguida refletido de volta ao seu ponto de partida deverá chegar mais tarde do que um raio sob as mesmas condições, percorrendo a mesma distância mas perpendicularmente ao movimento da Terra (tal como os barcos B e A). O instrumental utilizado acha-se esquematizado na Fig. 15. Uma vez que a Terra se

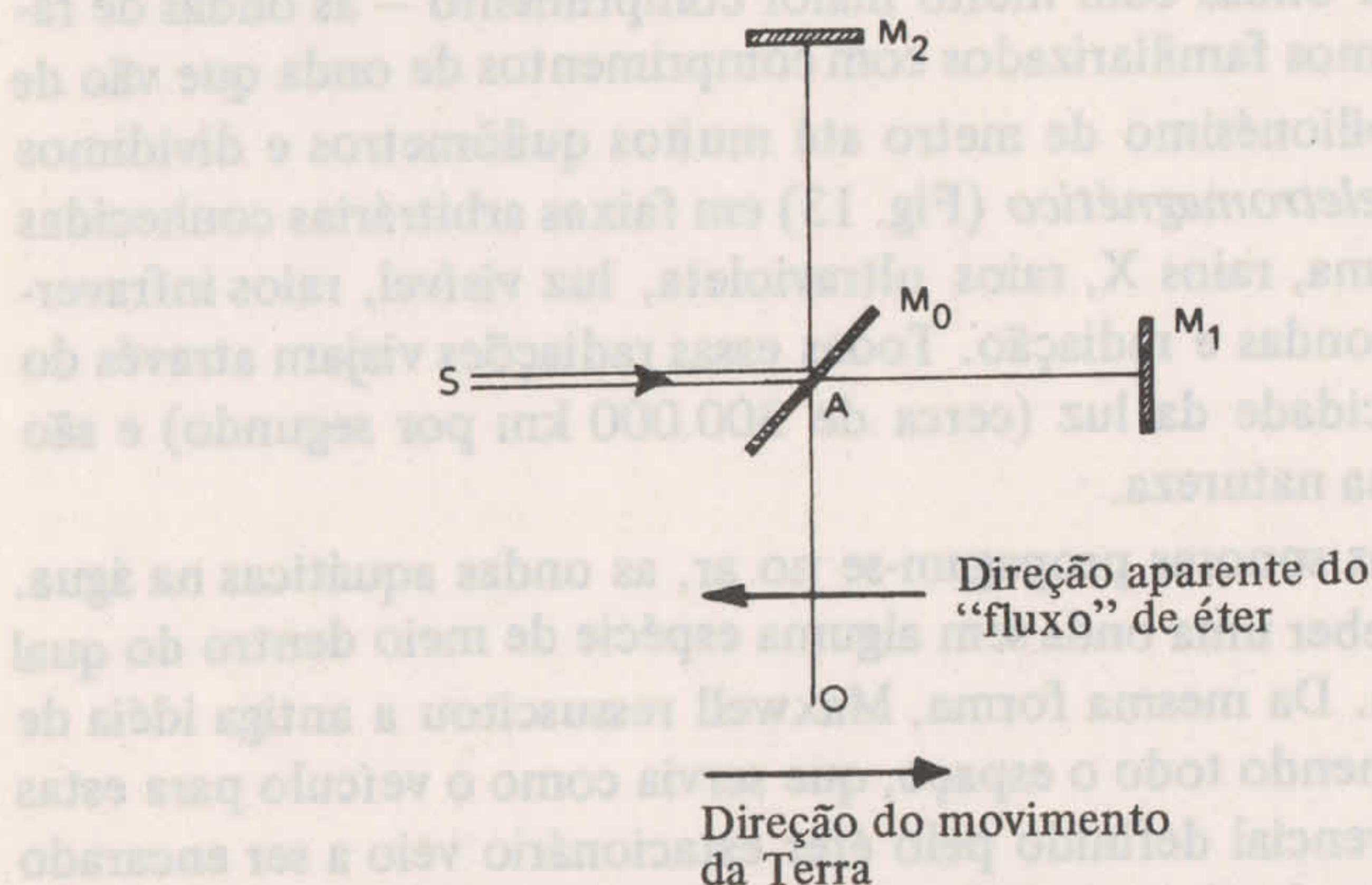



Fig. 15 Experiência de Michelson-Morley. *Este diagrama simplificado ilustra o princípio básico da experiência. Um raio de luz viaja da fonte S até um espelho M_0, que permite que metade do feixe luminoso se dirija em linha reta ao espelho M_1 enquanto reflete a outra metade ao espelho M_2, achando-se ambos os espelhos à mesms distância de A. Os feixes refletidos de M_1 e M_2 chegam novamente a M_0 e parte de cada um deles vai até o observador O. Se a luz se mover em velocidade constante em relação ao éter, e se a Terra se estivesse movendo através do éter, então este último pareceria fluir para trás do equipamento na direção da seta (tal como o fluxo da corrente da Fig. 14). Sendo este o caso, o feixe partido de M_1 deveria levar mais tempo do que o outro feixe para completar sua jornada e o observador em O deveria ser capaz de medir a extensão em que os feixes se desencontram. Todas as tentativas para realizar esta mensuração falharam, indicando que o postulado "fluxo" do éter não tinha qualquer efeito mensurável sobre os dois feixes luminosos.*

move ao redor do Sol a uma velocidade aproximada de 30 km por segundo, então, nesse trajeto, o éter deve estar fluindo para trás do instrumental a velocidade similar; a sensibilidade de um aparelho era tal que o movimento através do éter, mesmo de alguns quilômetros por segundo, estava dentro da sua capacidade de mensuração. De fato, por mais que a experiência fosse repetida, nenhuma diferença foi encontrada nos tempos de chegada dos raios de luz. Nos termos das lanchas, o resultado experimental parece não fazer sentido, porque implica que a velocidade do rio *não faz qualquer diferença* qualquer que seja o tempo levado pelas duas lanchas para completar suas jornadas.

Gradualmente os físicos perceberam que *nenhuma* experiência era capaz de demonstrar o movimento da Terra através do éter. Quando esta conclusão foi relutantemente aceita, fizeram-se tentativas para preservar a idéia do éter onipresente através de meios até certo ponto levianos, para não dizer desonestos. Durante a última década do século XIX, o físico holandês Hendrik Lorentz (1853-1928) e o físico irlandês George Fitzgerald (1851-1901) sugeriram independentemente que o movimento através do éter deveria encolher as réguas e retardar a velocidade dos relógios na exata proporção necessária para impedir que o movimento fosse determinado; se a distância corrente acima e abaixo fosse, de fato, mais curta do que a distância perpendicular à mesma, o resultado nulo estaria "explicado"; entretanto, qualquer instrumento usado para verificar a primeira distância seria reduzido na mesma proporção e a alteração de distância não poderia ser medida. Embora esta fosse uma forma muito conveniente de contornar o fato de que o movimento através do éter não podia ser observado também implicava, como assinalou o matemático francês Jules Henri Poincaré (1854-1912), que o éter, caso existisse, nunca podia ser detectado. Não parecia existir nenhum meio, mesmo em princípio, de resolver se o éter existia ou não e por isso pareceu razoável considerar somente os movimentos *relativos* ao invés dos absolutos.

Havia outro problema. Embora as leis da mecânica tivessem a mesma forma e fossem igualmente válidas em relação a todos os referenciais, qualquer que fosse seu movimento relativo, isto não parecia ser o caso no tocante à eletrodinâmica de Maxwell. A velocidade da luz através do éter era um elemento central nas equações de Maxwell e por isso essas equações se baseavam em um esquema particular de referência, o esquema do éter. Os observadores em movimento relativamente a esse esquema veriam efeitos diferentes e as leis da eletrodinâmica só

apresentariam a mesma forma para os observadores que estivessem em repouso em relação ao éter. Por que um ramo da física (mecânica) deveria ser indiferente ao movimento relativo uniforme enquanto outro (eletrodinâmica) dependia da velocidade do observador?

Teoria Especial da Relatividade

EM 1905, ALBERT EINSTEIN (1879-1955), então um obscuro secretário de patentes no Departamento de Patentes da Suíça, em Berna, publicou sua Teoria Especial da Relatividade, uma teoria que resolveu os problemas das experiências de Michelson-Morley e a teoria da eletrodinâmica, e que ao mesmo tempo fez desmoronar os alicerces abalados dos conceitos clássicos de espaço e tempo. A teoria repousava sobre dois postulados fundamentais.

O primeiro era o *princípio da relatividade*, segundo o qual todos os referenciais inerciais são inteiramente equivalentes no que se refere ao desempenho de todas as experiências físicas. Isto implica que desde que um laboratório não esteja nem sendo acelerado nem em rotação – isto é, se está se movendo em velocidade uniforme – seu movimento não terá qualquer efeito sobre os resultados das experiências realizadas dentro dele. Todos os observadores em movimento relativo uniforme deduzirão as mesmas leis físicas dos resultados de suas experiências. O princípio da relatividade aboliu a distinção entre o comportamento das leis da mecânica e das leis da eletrodinâmica e tornou toda a idéia do éter do espaço absoluto de Newton inteiramente redundante. A base de mais de dois séculos de física estabelecida foi varrida de um só golpe.

O segundo postulado estabelecia que a velocidade da luz era constante em todos os referenciais inerciais. Em outras palavras, a velocidade da luz, medida por qualquer observador em movimento uniforme, não é afetada pela velocidade relativa da fonte e do observador. Isto é totalmente contrário ao que o senso comum admitiria. Se dois trens estão se aproximando um do outro, cada um deles movendo-se a 100 km por hora, não hesitaríamos em dizer que a velocidade relativa dos dois trens é 100 + 100 = 200 km por hora. Se uma nave espacial, viajando a 100 km por segundo, está se aproximando de uma fonte de luz e se a luz está viajando desta fonte a uma velocidade de 300.000 km por segundo, o senso comum sugeriria que a velocidade relativa da luz e da nave, medida por um observador situado na nave, seria 400.000 km por

segundo. De acordo com a Relatividade Especial, entretanto, o observador verificaria que a velocidade da luz seria precisamente 300.000 km por segundo. A velocidade da nave não teria qualquer efeito sobre a velocidade daquele raio de luz. Embora estas conclusões possam parecer absurdas, estão inteiramente de acordo com o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley, assim como com o fracasso de todas as outras experiências destinadas a mostrar que o movimento da fonte ou do observador não tem qualquer efeito sobre a mensuração da velocidade da luz. O Universo é construído de tal maneira que todos os observadores encontrarão o mesmo valor para a velocidade da luz. Diante das provas resultantes de muitas experiências cuidadosamente realizadas, a única opção é aceitar estas conclusões, embora muitas delas vão contra aquele conjunto limitado de experiência local que denominamos "senso comum".

As observações de posição e de tempo realizadas por observadores em movimento uniforme relativo estão relacionadas mediante um conjunto de equações conhecidas como as *transformações de Lorentz*. Einstein adaptou as equações da mecânica newtoniana de tal forma que elas, as equações de Maxwell e a velocidade da luz são invariáveis (isto é, assumem a mesma forma em diferentes sistemas de coordenadas) quando relacionadas através da transformação de Lorentz. Armados com estas equações, os físicos podem verificar que as observações feitas por diferentes experimentadores se relacionam entre si.

Numerosas conseqüências interessantes decorrem da aceitação dos postulados da teoria de Einstein.

Contração de comprimento: Tal como Lorentz e Fitzgerald já haviam suspeitado anteriormente, o comprimento de um objeto em movimento é afetado por este movimento. Se uma nave espacial passa em alta velocidade por um observador (o qual rotularemos de "estacionário" embora aceitando que nada no Universo pode ser chamado realmente de "fixo"), parecerá ao observador estacionário ter encolhido em termos de comprimento de uma quantidade que depende da velocidade da nave. Quanto mais a nave se aproxima da velocidade da luz mais pronunciado se torna este efeito até – se fosse possível para ela deslocar-se precisamente à velocidade da luz (c) – que se observasse um comprimento zero. Os valores da contração do comprimento para diferentes velocidades são fornecidos no Quadro 1.

Os habitantes da nave não teriam consciência deste efeito. Para eles, tudo estaria normal, pois a "contração" teria afetado tudo dentro da nave em igual proporção. Eles poderiam observar, entretanto, que o observador da nave aparentemente teria diminuído de comprimento — pois sua velocidade relativa a eles certamente seria a mesma que sua velocidade relativa a ele.

GRAVIDADE

Quadro 1 Contração do comprimento, dilatação do tempo e aumento da massa

	Contração do comprimento	Aumento da massa	Dilatação do tempo
Velocidade (v) como uma fração da velocidade da luz (c): v/c	Comprimento (l) de um objeto em movimento como uma fração de seu comprimento em repouso (l_0)	Massa (m) de um objeto em movimento comparada com sua massa em repouso (m_0)	Duração de um intervalo de tempo (Δt) medida com um relógio em movimento comparada com o intervalo (Δt_0) medida com um relógio "estacionário"
0	1,000	1,000	1,000
0,1	0,995	1,005	0,995
0,5	0,867	1,155	0,867
0,7	0,714	1,400	0,714
0,9	0,436	2,294	0,436
0,99	0,141	7,089	0,141
0,999	0,045	22,366	0,045

Os termos comprimento em repouso (l_0) e massa em repouso (m_0) se referem ao comprimento e à massa que um objeto em movimento de comprimento l e massa m teria se estivesse estacionário em relação ao observador. As relações entre l e l_0, m e m_0 e Δt e Δt_0 são as seguintes:

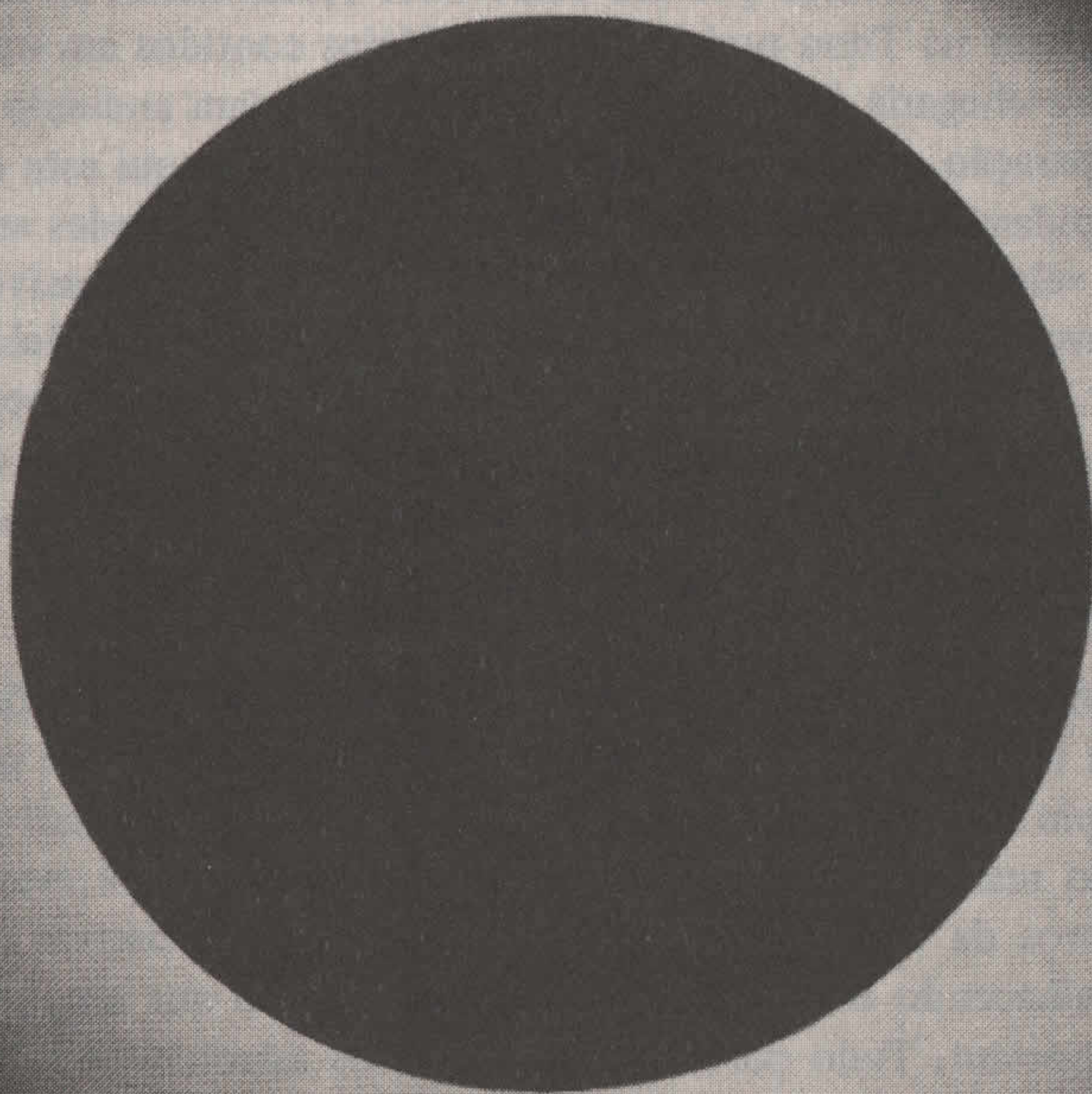
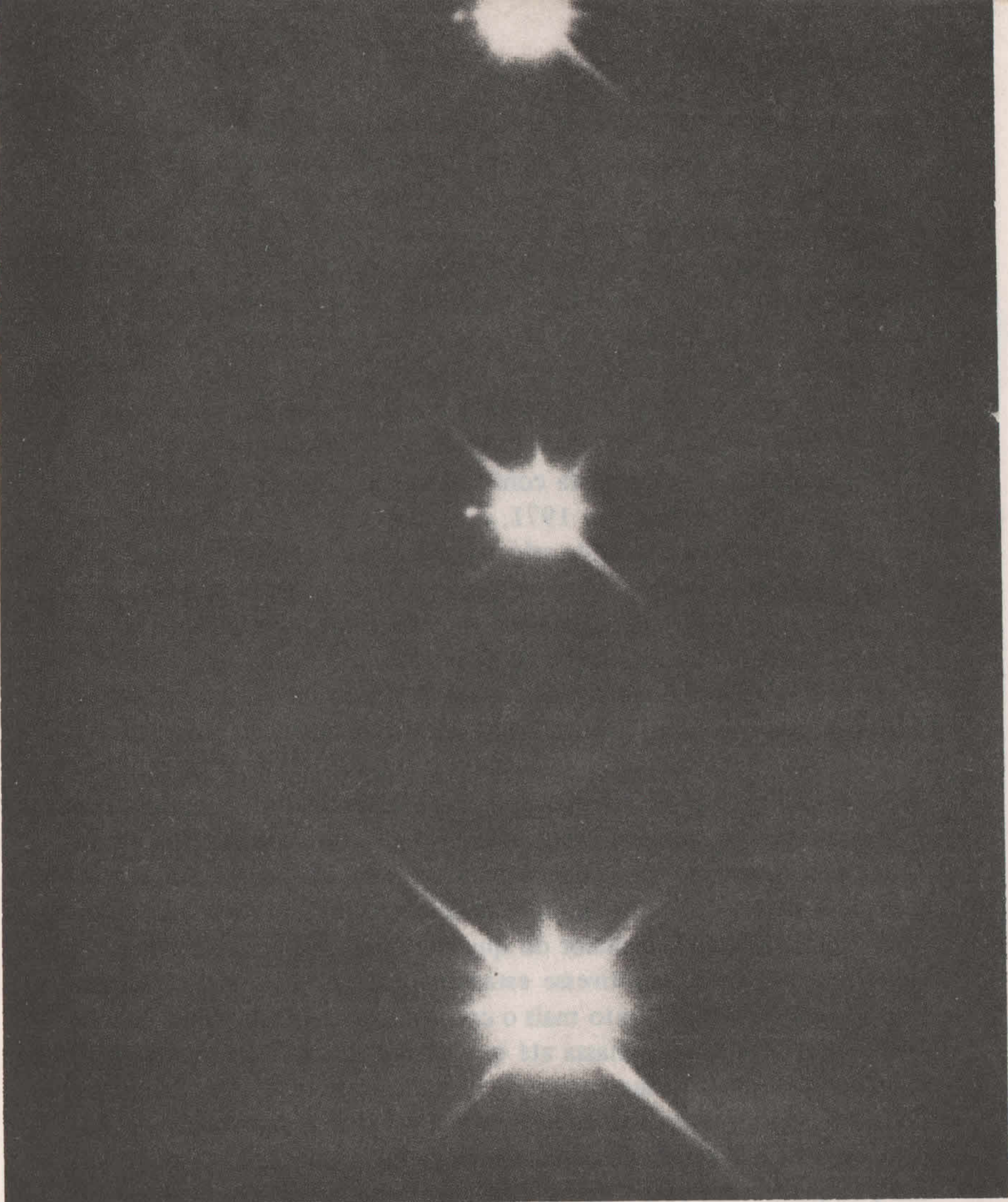
$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2};$$

$$m = m_0/\sqrt{1 - v^2/c^2};$$

$$\Delta t = \Delta t_0$$

Dilatação do tempo: A proporção na qual o tempo passa em uma nave espacial em rápido movimento é mais lenta do que a proporção da passagem de tempo medida por um observador estacionário. Se um observador situado na Terra pudesse ver os relógios contidos em uma veloz espaçonave chegaria à conclusão de que eles estariam andando devagar em comparação com seu próprio relógio. Também aqui este efeito se torna rapidamente mais óbvio à medida que as velocidades se aproximam da velocidade da luz (Quadro 1) até que, se fosse possível para a espaçonave mover-se a esta velocidade (*c*), o tempo dentro dela pareceria parar em comparação com o tempo do observador estacionário. O tempo medido por um relógio que um observador leva consigo é conhecido como o *tempo próprio*; todos os outros relógios em movimento relativo a este observador andam mais devagar do que o seu próprio relógio.

Isto afeta a todos a bordo – inclusive os processos atômicos e, acima de tudo, os relógios biológicos da tripulação. Se assim não fosse o princípio da relatividade seria violado, porque seria possível para a tripulação realizar medidas que revelariam seu estado de movimento; os membros da tripulação poderiam, por exemplo, observar que estavam envelhecendo mais ou menos rapidamente do que seus relógios a bordo sugeriam. Tudo parece normal para os astronautas a bordo da nave, mas no tocante aos observadores terrestres a tripulação está envelhecendo mais devagar do que seus parentes que ficaram na Terra. Se um membro de um par de gêmeos fosse realizar uma longa jornada a uma velocidade próxima da luz, ao voltar encontraria seu irmão muito mais velho do que ele. Se, ao fazer 20 anos, Jane fosse enviada em uma viagem até uma estrela a 21 anos-luz de distância, em uma espaçonave capaz de viajar a 99 por cento da velocidade da luz, enquanto seu irmão gêmeo John permanecia na Terra, desprezando-se o tempo perdido com a aceleração e a desaceleração, ela voltaria ao nosso planeta após pouco mais de 42 anos do tempo terrestre para encontrar John agora com 62 anos. Para Jane somente se teriam passado cerca de seis anos.

O resultado pode parecer ridículo, mas o efeito da dilatação do tempo foi confirmado através de várias experiências e não existe dúvida de que o que foi descrito é o que aconteceria em uma situação real. Os raios cósmicos (partículas atômicas carregadas que atingem a Terra provenientes do espaço) chocam-se com a atmosfera e produzem partículas de vida muito curta chamadas múons, as quais se desintegram em um período médio de cerca de 2 milionésimos de segundo, medidas em rela-

O eclipse solar total de 29 de maio de 1919, fotografado pela expedição do Observatório Real a Sobral, no Brasil. Foi durante este eclipse que as fotografias batidas pela equipe de Sir Arthur Eddington confirmaram a previsão da Teoria Geral da Relatividade de Einstein segundo a qual a luz é desviada por um campo gravitacional; as estrelas próximas ao Sol foram observadas fora de suas posições normais de uma distância coerente com a teoria de Einstein. (Cortesia do Observatório Real de Greenwich.)

Sirius A e B. A brilhante estrela Sirius (a mais brilhante estrela do nosso céu) tem uma companheira muito mais fraca (B) mostrada nesta série de fotografias. As duas estrelas formam um sistema binário. Embora ambas possam ser vistas quando sua separação angular é maior, quando elas se aproximam o brilho de Sirius A ofusca a luz de B. A presença de B foi deduzida em 1834 em conseqüência de observações da influência gravitacional que B exerce sobre o movimento de A, mas só em 1862 B foi observada pela primeira vez. Sirius B é uma anã branca. (Foto obtida pelo Observatório Lick.)

ção a um referencial para o qual elas estão em repouso. Estas partículas são produzidas a uma altitude de pelo menos 10 km; muito embora viajem a uma velocidade muito próxima da luz, se não houvesse nenhum efeito de dilatação do tempo elas cobririam uma distância menor do que 1 km antes de se desintegrarem. Entretanto, por causa de suas velocidades muito elevadas, o fator de dilatação do tempo é suficientemente grande para suas vidas se estenderem até o ponto de serem encontradas ao nível do solo.

Esta explicação foi apresentada em 1941 por B. Rossi e D. B. Hall e desde aquela época muitas experiências de laboratório sobre partículas atômicas de vida curta confirmaram as previsões da Relatividade Especial. Na verdade, em 1971, J. C. Hafele e R. E. Keating fizeram um teste direto transportando relógios atômicos ao redor do mundo em aviões a jato e comparando os tempos registrados com o que fora marcado por um relógio "estacionário" no Laboratório Naval dos Estados Unidos; os resultados concordaram com a teoria.

A dilatação do tempo abre a possibilidade da viagem através do tempo – mas apenas no futuro. Não é permitido voltar ao passado.

Aumento da massa: Ao adaptar a segunda lei de Newton para satisfazer a Teoria Especial da Relatividade, Einstein achou que uma outra conseqüência da teoria era que a massa de um corpo é afetada pelo seu movimento. A massa de um corpo em movimento, analisada por um observador "estacionário", é maior do que sua massa em repouso (isto é, a massa que ela teria se estivesse estacionária de acordo com o referencial do observador). Quanto mais o corpo se aproxima da velocidade da luz, maior se torna sua massa até que, se fosse possível para ele viajar à velocidade da luz, sua massa se tornaria infinita. Isto implica que nenhum corpo material pode ser levado a viajar à velocidade da luz, uma vez que a quantidade de energia necessária para acelerar mesmo só um pouquinho um corpo que já está quase viajando à velocidade da luz é muito grande; e uma *infinita* quantidade de energia seria necessária para acelerar mesmo o pingo deste "i" até a velocidade da luz. Considerando os recursos disponíveis, podemos nos aproximar da velocidade da luz até onde assim desejarmos, mas ela jamais será atingida. A velocidade da luz é uma barreira absoluta às velocidades das partículas materiais.

Equivalência entre massa e energia: Outra conseqüência da teoria, relacionada com a variabilidade da massa, é que massa e energia são intercambiáveis: a massa pode ser convertida em energia e a energia em massa. Se uma certa quantidade de massa (m) é convertida em energia, a quantidade de energia liberada (E) é dada pela fórmula $E = mc^2$, onde c significa a velocidade da luz. Uma vez que a velocidade da luz é um número grande e quando elevada ao quadrado é um número ainda maior, segue-se que uma grande quantidade de energia pode ser obtida a partir da destruição de uma pequena quantidade de matéria. Este aspecto da teoria foi de importância vital para nos levar a compreender como o Sol e as estrelas estão brilhando (veja Capítulo 6) e como subjugar a energia nuclear. Também levou, diga-se de passagem, ao desenvolvimento do terrífico arsenal de armas atômicas que existe no mundo de hoje. A este respeito, Einstein comentou: "Se eu soubesse disso, teria me tornado um relojoeiro".

Mais veloz que a luz?

UM ASPECTO importantíssimo da Teoria da Relatividade é a afirmação de que nada pode viajar mais depressa do que a luz. De fato, esta afirmação não é *absolutamente* correta. Certamente nenhum objeto material pode ser levado a viajar à velocidade da luz e por isso parece evidente que nada pode viajar *mais velozmente* do que a luz; afinal de contas, se você está dirigindo e acelera 50 km/h a 70 km/h, em algum ponto você deve estar viajando a 60 km/h. Entretanto, foi observado que podem ser consideradas partículas com valores finitos de massa e energia desde que sempre viajam mais depressa do que a luz: à medida que suas velocidades diminuem em direção à "barreira da luz" suas massas aumentam em direção a valores infinitos. As partículas hipotéticas foram denominadas táquions: assim como as partículas materiais ordinárias não podem ser aceleradas até a velocidade da luz, assim os táquions não podem ser desacelerados até a velocidade da luz. Se os táquions existem ou não é ainda questão de debate.

O ponto crucial a respeito da relatividade é que nenhuma informação pode ser comunicada mais velozmente do que a luz. Se fosse possível enviar um sinal mais veloz do que a luz, seguir-se-iam as mais estranhas conseqüências. Seria possível saber a ocorrência de um evento antes que ele ocorresse e então — com base nesse conhecimento — evitar

que o acontecimento ocorresse! É claro que existe um paradoxo aqui. Da mesma forma, se um viajante espacial pudesse fazer uma jornada mais veloz do que a luz, poderia retornar antes de ter decolado e persuadir a si mesmo a não ir uma vez que já tinha feito a viagem!

Se a informação pudesse ser comunicada mais depressa do que a luz, então a fundamental lei da causalidade, segundo a qual a causa deve sempre preceder o efeito, seria violada. Não existiria qualquer padrão lógico para os acontecimentos no Universo e estes seriam aleatórios e imprevisíveis. Temos um interesse velado em que *não* seja possível comunicar mais depressa do que a luz. Mesmo que os táquions existam, entretanto, isto não precisa se transformar em um problema, desde que eles não podem ser usados para veicular informação de um lugar para outro.

Espaço-tempo

EM NOSSA experiência diária estamos acostumados a pensar em um mundo de três dimensões. Os objetos contidos no espaço possuem comprimento, largura e altura. Em tácito acordo com Newton tendemos a pensar sobre o tempo como algo separado e independente, que flui para o passado em velocidade uniforme. Entretanto, a Relatividade Especial afirma claramente que não podemos pensar no tempo como algo isolado e imutável. Não existe qualquer padrão absoluto para medir o tempo ou o espaço; ambos os tipos de medida são afetados pelo movimento relativo dos observadores. Se dois observadores em movimento uniforme relativo assistissem os mesmos acontecimentos separadamente não concordariam nem sobre a separação espacial entre estes dois acontecimentos nem quanto ao período de tempo que decorreu entre eles.

Em 1907 o matemático russo Hermann Minkowski (1864-1909) propôs que deveríamos tratar as três dimensões do espaço e a dimensão do tempo como intimamente ligadas; todos os eventos no Universo deveriam estar ocorrendo em um espaço-tempo quadridimensional. Como observou Minkowski: “Daqui para a frente o espaço em si mesmo e o tempo em si mesmo estão destinados a se transformarem em meras sombras e somente uma espécie de união entre eles preservará uma realidade independente”. Minkowski chamava a soma de todos os acontecimentos “o universo” e a trajetória de uma partícula isolada no espaço-tempo denominava “linha de universo”. É claro que não po-

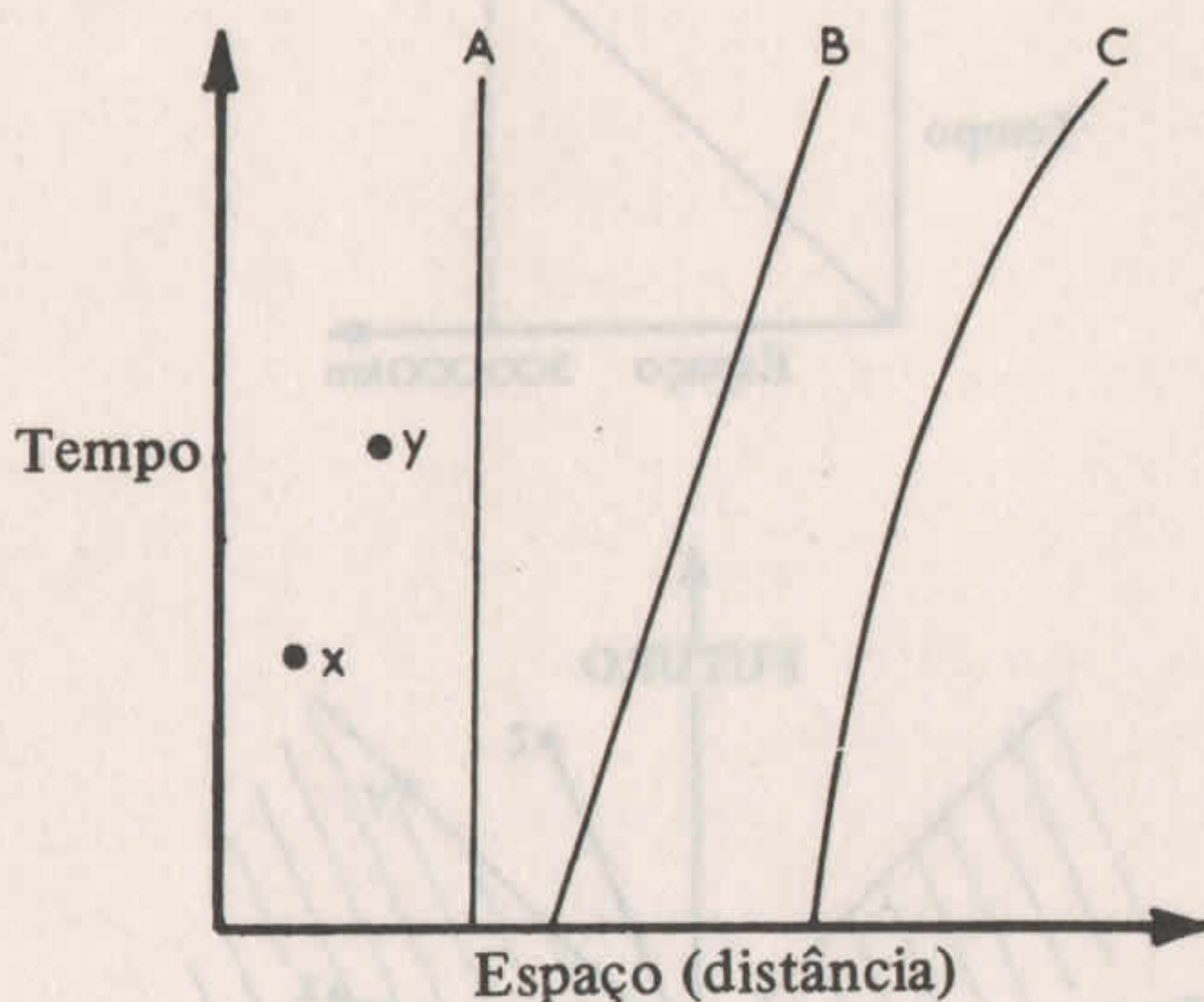



Fig. 16 Um diagrama espaço-tempo. *O tempo é medido na direção vertical e as três dimensões do espaço são representadas pela direção horizontal, isto é, a direção horizontal indica a distância no espaço,* x *e* y *são dois eventos ou pontos de universo. A linha A representa uma partícula estacionária (sua posição no espaço não muda com o tempo), a linha B representa uma partícula que se move com velocidade constante (sua posição muda uniformemente) e a linha C indica uma partícula que está sendo acelerada (a qual parte do repouso e se move com velocidade crescente).*

demos desenhar em quatro dimensões, mas podemos facilmente desenhar um "mapa" no qual medimos o tempo na direção vertical e a distância na direção horizontal. Tal mapa é conhecido como um *diagrama espaço-tempo* (Fig. 16). Na figura, a linha vertical representa uma partícula estacionária, que permanece todo o tempo no mesmo lugar, a linha reta inclinada em um ângulo representa uma partícula movendo-se com velocidade uniforme e a linha curva indica uma partícula acelerada do repouso até uma velocidade finita.

É conveniente construir as escalas sobre os eixos deste diagrama tais que a velocidade da luz seja representada por uma linha que faz um ângulo de 45^{o} com cada eixo. Um raio de luz viaja a uma distância de cerca de 300.000 km em um segundo; portanto, 1 segundo de tempo sobre o eixo vertical tem o mesmo "comprimento" que 300.000 km na escala horizontal. Uma vez que as partículas materiais devem viajar mais lentamente do que a luz, suas linhas de universo devem estar inclinadas

(a)

(b)

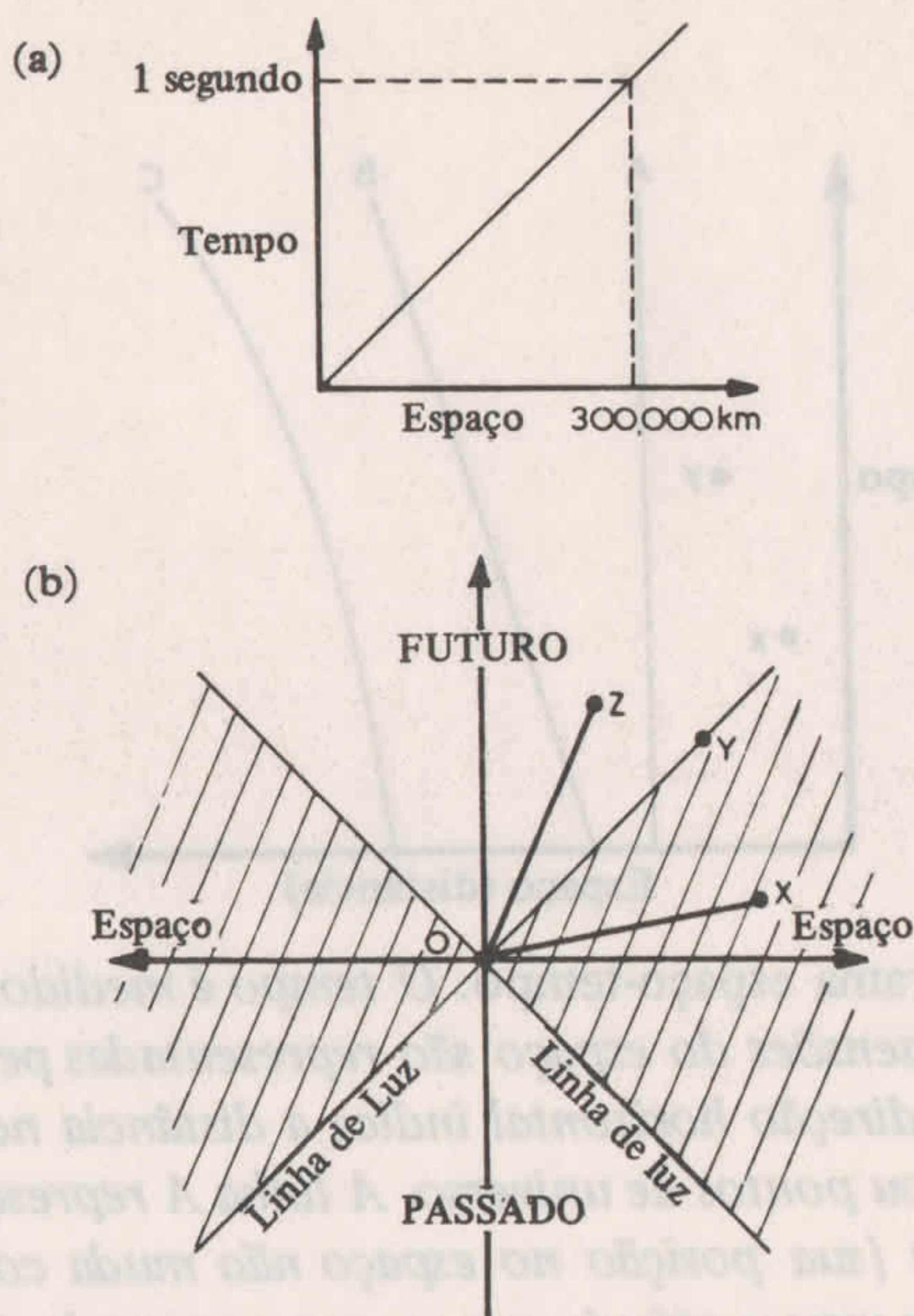



Fig. 17 Regiões acessíveis e inacessíveis do espaço-tempo. *(a) A escala do diagrama espaço-tempo é escolhida com freqüência de maneira tal que a velocidade da luz (300.000 km/seg) seja representada por uma linha inclinada em relação ao eixo vertical (tempo) de 45°.* (b) *O diagrama espaço-tempo centrado no observador O estende-se para o passado e para o futuro. As linhas indicando a velocidade da luz (linhas de luz) traçadas através de O dividem todo o espaço-tempo em três regiões hachureadas. As regiões à esquerda e à direita são inacessíveis a O uma vez que, para atingir um ponto qualquer nessa região, ele teria de viajar mais depressa do que a luz. O cone superior situado entre as linhas de luz representa o futuro de O ao qual, sem exceder a velocidade da luz, ele poderá estar presente em qualquer ponto daquela região ou poderá influenciar qualquer ponto daquela região por meio de um sinal. O cone inferior representa seu passado; mais uma vez, ele poderia ter estado presente em qualquer ponto daquela região ou poderia ter sido influenciado por um sinal emanado de tal ponto. A linha OX é chamada* espaciforme *e apresenta uma viagem proibida, mais veloz do que a luz; OY indica uma viagem com a velocidade da luz, ou trajetória* nula; *e OZ indica uma viagem* espaciforme, *mais lenta do que a luz.*

em relação à vertical de ângulos menores do que 45°: tais linhas são denominadas *tempiformes*.

A velocidade da luz, como um limite, permite-nos dividir o espaço-tempo de um dado observador em três regiões distintas (Fig. 17). O cone superior na figura representa os eventos futuros aos quais o observador pode estar presente viajando mais devagar do que a velocidade da luz; este é o seu *futuro*. O cone inferior representa os acontecimentos passados aos quais ele podia ter estado presente – novamente sem exceder a velocidade da luz. O restante do espaço-tempo é inacessível para ele. Não pode influenciar os acontecimentos nessa região sem realizar uma viagem mais veloz do que a luz, o que é proibido. As trajetórias proibidas, representadas pelas linhas inclinadas mais de 45° em relação à vertical, são chamadas *espaciformes*. Se a relatividade está correta, nenhuma informação pode ser transmitida ao longo de trajetórias espaciformes.

Como veremos nos próximos capítulos, os diagramas espaço-tempo proporcionam um meio muito útil de examinar o comportamento das partículas e dos corpos materiais.

Uma propriedade muito útil do espaço-tempo é que em suas quatro dimensões podemos definir o *intervalo* "quadridimensional" entre os acontecimentos de uma forma com a qual todos os observadores inerciais concordarão. Embora os observadores isolados discordem quanto à distância no espaço e o período de tempo entre dois acontecimentos, se eles combinarem suas observações do espaço e do tempo de maneira apropriada acabarão chegando exatamente ao mesmo valor do intervalo espaço-tempo entre os acontecimentos. O intervalo espaço-tempo entre os acontecimentos tem o valor definido e absoluto. Os diferentes observadores encontrarão diferentes projeções deste intervalo sobre seus eixos de tempo e de espaço, mas todos concordarão quanto ao valor do intervalo. Diferentes observadores em movimento uniforme relativo verão diferentes aspectos dos intervalos, tal como uma caixa retangular oblonga parece um retângulo quando vista de um lado e um quadrado de outro.

Einstein não custou a se dar conta dos benefícios da descrição do espaço-tempo como estrutura adequada para o tratamento da Relatividade Especial, e as leis da natureza, desde então, vêm sendo expressadas em termos quadridimensionais. Nosso Universo, então, parece ser quadridimensional. Não podemos pensar no espaço e no tempo como entidades separadas; ao invés disso, estão intimamente ligados. Se alterar-

mos nossa percepção do espaço – por exemplo, viajando em uma espaçonave em alta velocidade – alteraremos também nossa percepção do tempo.

A Relatividade Especial produziu uma completa revolução na maneira de pensarmos no espaço-tempo e no Universo, mas não foi esta a única revolução que ocorreu na física no início do século XIX. Ao mesmo tempo outra reviravolta igualmente significativa estava ocorrendo em nossa compreensão da natureza da radiação e da matéria.

Teoria do quantum

UM "CORPO NEGRO", nos termos do físico, é um irradiador ideal de energia. Absorve toda a radiação que cai sobre ele e emite todos os comprimentos de onda de radiação. O problema que surgiu no início do século XX era que a teoria clássica (baseada nas equações de Maxwell) da emissão de radiação pelos corpos aquecidos não concordava com a observação. A teoria, tal como apresentada por volta de 1900 pelo Barão Rayleigh (1842-1919) e por James Jeans (1877-1946), concordava perfeitamente com as observações de comprimentos de onda mais longos mas, em se tratando de comprimentos de ondas curtos, ele via que todos os corpos com temperaturas acima de zero absoluto ($-373^{\circ}C = 0$ K) irradiariam quantidades infinitas de energia. É claro que isto não podia ser assim – ou não estaríamos aqui! De forma semelhante, o físico alemão Wilhelm Wien (1864-1928) construíra uma teoria que funcionava bem para comprimentos de ondas mais curtos mas não para os mais longos.

Em 1901 o físico alemão Max Planck (1858-1947) resolveu o problema propondo que a radiação é emitida em pequenos invólucros, ou *quanta*, de energia, sendo a energia de cada *quantum* relacionada com o comprimento de onda correspondente de radiação emitida através de uma constante, hoje conhecida como constante de Planck. Quando se admitiu que a radiação era liberada em uma série de pequenos e discretos "surtos", foi possível constuir uma teoria da radiação que concordava com a observação e eliminava a possibilidade drástica (conhecida como a "catástrofe ultravioleta") de que todos os corpos irradiariam quantidades infinitas de ondas curtas letais.

Em 1911, Ernest Rutherford (1871-1937), do Laboratório Cavendish, em Cambridge, propôs a teoria de que o átomo – até aí considerado a menor quantidade indivisível de matéria – consistia de um

núcleo central maciço conduzindo carga elétrica positiva, circundado por partículas "leves" negativamente carregadas, conhecidas como elétrons. Dois anos mais tarde o físico dinamarquês Niels Bohr (1885-1962) desenvolveu a teoria da irradiação de energia pelos átomos (sob a forma de luz e outras radiações eletromagnéticas) com base nos princípios do quantum. Argumentava, no caso do átomo de hidrogênio, que o elétron só podia se mover em certas órbitas circulares de formas bastante semelhantes às dos planetas em torno do Sol. Quando o átomo de hidrogênio recebe energia o elétron salta de uma órbita mais baixa (de energia mais baixa) para uma órbita mais alta (de energia mais alta). Inversamente, após um breve intervalo, aquele elétron cai de volta até um nível de energia mais baixa: a energia liberada ao cair para o nível mais baixo é emitida como um quantum de luz de comprimento de onda característico, relacionado com a mudança de energia do átomo por meio da constante de Planck.

Esta descoberta explicou o fato de que, quando um gás rarefeito de um determinado elemento químico (tal como o hidrogênio) é aquecido até emitir luz, esta luz só é emitida em determinados comprimentos de onda e não em um espectro contínuo de todas as cores e comprimentos de onda. Da mesma forma, se um espectro de luz contínuo obtido a partir de um corpo aquecido denso (tal como o interior do Sol) atravessa um gás mais rarefeito, esse gás absorverá a luz destes mesmos comprimentos de onda particulares, de tal forma que, quando a luz é examinada com um espectroscópio, o espectro resultante consiste de uma faixa contínua de cor sobreposta a um padrão de linhas escuras de *absorção*.

A visão quântica da matéria e da radiação foi grandemente apoiada por experiências que demonstravam que os elétrons podiam ser ejetados de certas espécies de sólidos ao iluminá-los. O fato curioso era que as energias dos elétrons ejetados dependiam do comprimento de onda da luz usada ao invés da intensidade do feixe. Einstein explicou isso, o efeito fotoelétrico, nos termos da teoria quântica, assinalando que a energia adquirida por um elétron dependia do comprimento de onda do quantum de luz que ele absorvera. Quanto mais curto o comprimento de onda, maior a energia. Por conseguinte, a luz de um comprimento de onda mais curto do que um certo valor era necessária para desalojar um elétron do seu átomo; um feixe mais intenso, de um comprimento de onda mais *longo*, não obteria esse efeito. Foi por esta descoberta que

Einstein ganhou em 1921 o Prêmio Nobel de Física. Os quanta, ou "partículas" de luz, são conhecidos hoje como *fótons*.

Estas e outras descobertas demonstraram que sob certos aspectos a luz se comportava como partícula e sob outros como uma onda em movimento. Uma notável experiência realizada em 1927 por C. Davisson (1881-1958) e L. H. Germer (1896-1971) mostrou que um feixe de elétrons atingindo um cristal se comportava da maneira que se esperaria das ondas. As partículas, ao que parecia, às vezes se comportavam como ondas e as ondas às vezes se comportavam como partículas. A matéria e a energia apresentavam uma dualidade onda-partícula tal que às vezes era melhor encará-las como ondas e outras vezes tratá-las como partículas.

Quando dois feixes de luz se encontram, interferem entre si para produzir uma imagem de luz e de zonas escuras sobre uma tela. A forma do padrão de interferência pode ser calculada a partir das propriedades *ondulatórias* da luz. Também podemos encarar o assunto do ponto de vista dos fótons (*partículas* de luz): a descrição ondulatória nos diz que existe uma alta probabilidade de achar fótons em alguns lugares (correspondentes às zonas brilhantes) e uma pequena probabilidade de achá-los em outros (as zonas escuras).

O que a mecânica quântica demonstrou é que o conceito de probabilidade permeia a natureza de forma bastante fundamental. Ao nível microscópico (por exemplo, lidando com fótons ou partículas isoladas) não podemos prever os resultados de uma experiência particular (onde aquele fóton atingirá); tudo que podemos fazer é calcular as probabilidades de diferentes desfechos (é mais provável que o fóton atinja um lugar do que outro). Somente com grandes números de partículas podemos fazer previsões razoavelmente precisas de como ocorrerá a experiência. Este é um ponto de vista muito profundo, pois implica que existe um limite para nossa capacidade de prever a futura evolução dos acontecimentos. Existe um inescapável elemento de chance no Universo.

Este aspecto da teoria quântica foi bem esclarecido em 1927 pelo físico alemão Werner Heisenberg (1901-1976) no seu *princípio da incerteza*. Este princípio demonstrava que era impossível medir precisamente duas propriedades complementares de uma partícula, tais como sua velocidade e sua posição. Pelo simples fato de precisar uma quantidade (digamos, tentando demarcar precisamente a posição) afetamos a outra quantidade (velocidade). Heisenberg ilustrou este princípio refe-

rindo-se a um microscópio hipotético. Se fôssemos tentar medir a posição de um elétron cujo momento já fosse conhecido, para ver o elétron e determinar sua posição em instante preciso, teríamos de iluminá-lo com fótons. A energia transferida ao elétron por um fóton que o atingisse mudaria seu momento de uma determinada quantidade. Terminaríamos conhecendo sua posição, mas ficaríamos indecisos a respeito de seu momento! Trata-se de um princípio fundamental de importância crucial. Implica que, quanto mais precisamente conhecemos uma quantidade, menos precisamente podemos conhecer outra quantidade relacionada.

Grandes avanços foram atingidos nos anos subseqüentes à compreensão da natureza das partículas e pela aplicação da teoria quântica em grande variedade de ramos da física. Os blocos básicos da matéria, os átomos, mostraram-se divisíveis em uma incrível gama de quantidades de partículas subatômicas e nucleares. A imagem simples de um átomo constituído de um núcleo pesado feito de prótons carregados positivamente e nêutrons, circundados por uma nuvem de elétrons carregados negativamente, deu lugar a uma imagem na qual as partículas materiais podem ser subdivididas em uma multidão de partículas mais fundamentais caracterizadas por várias propriedades tais como massa, carga e *spin* (os elétrons, por exemplo, podem ser considerados como "girando" sobre um eixo imaginário). Foi demonstrado em 1928 pelo físico de Cambridge P. A. M. Dirac que cada tipo fundamental de partícula tem sua antipartícula, a qual apresenta propriedades inversas: a antipartícula do familiar elétron, por exemplo, é o pósitron, uma partícula que tem a mesma massa do elétron mas carga oposta. Quando uma partícula encontra sua antipartícula, as duas se aniquilam mutuamente, liberando um surto de irradiação gama de alta energia. Inversamente, de acordo com a equivalência einsteiniana entre massa e energia, foi demonstrado que raios gama de alta energia também podem criar pares de partículas e antipartículas – elétrons e pósitrons.

A teoria quântica e a Relatividade Especial foram reunidas com êxito na eletrodinâmica quântica, uma teoria sobre a força eletromagnética que trata as interações governadas por esta força nos termos de partículas interatuantes trocando fótons entre si. As forças que atuam no núcleo dos átomos, as chamadas forças nucleares fracas e fortes, também podem ser descritas em termos quânticos. Os físicos acham que será possível descrever a gravitação em termos quânticos, mas até agora têm tido pouco sucesso.

A Relatividade Especial e a teoria quântica transformaram nossas idéias a respeito do espaço, do tempo, da matéria e da radiação através de duas revoluções que ocorreram na primeira parte deste século. Einstein foi responsável por outra revolução que teve lugar em nossa concepção da natureza da gravitação ao publicar, em 1915, sua Teoria Geral da Relatividade.

5
A gravidade examinada de novo

A GRAVITAÇÃO newtoniana era encarada como uma força que atuava instantaneamente através do espaço entre corpos portadores de massa. A força da gravidade atuante entre dois corpos dependia de suas massas e da distância entre eles. Isto não trazia nenhum problema particular enquanto o espaço e o tempo absolutos eram admitidos, porque a separação entre os dois corpos e o tempo podiam ser definidos inequivocamente. A Relatividade Especial derrubou estes dois pilares fundamentais da teoria newtoniana: o espaço e o tempo não eram absolutos e observadores diferentes em movimento uniforme relativo discordariam sobre a questão do tempo e da separação entre os corpos. Além disso, desde que a velocidade da luz representa uma barreira absoluta à comunicação da informação no Universo, a idéia da propagação instantânea da gravidade não era aceitável.

Não obstante, a teoria de Newton foi muito boa, como demonstraram seus muitos sucessos. Para uma nova teoria da gravidade, baseada em princípios relativistas, vir à tona, teria de concordar em suas previsões com a teoria newtoniana em todas as circunstâncias, a não ser as mais excepcionais. No início do século XIX havia apenas um exemplo de uma situação na qual a teoria de Newton falhara – e mesmo aí, apenas marginalmente – para explicar um efeito observado. A órbita do planeta Mercúrio, de acordo com as observações de U. Leverrier, em 1859, comportava-se de uma forma que não podia ser explicada pela

lei da gravitação de Newton. Devido aos conhecidos efeitos perturbadores dos outros planetas do Sistema Solar, a órbita de Mercúrio devia mover-se lentamente ao redor do Sol de tal forma que o ponto de maior proximidade (periélio) avançasse em posição de um ângulo 5.557 segundos de medida angular em cada século. De fato, como Leverrier assinalou, o periélio de Mercúrio avança de uma quantidade maior do que a esperada cerca de 43 segundos em cada século. Não se trata de uma grande discrepância, talvez, mas tal era o nível ao qual a teoria da gravitação avançara nessa época que os efeitos perturbadores dos planetas podiam ser calculados com muito melhor precisão do que as dimensões do erro. Leverrier sugeriu que a discrepância podia se dever à presença de um planeta até então desconhecido, mais próximo do Sol do que Mercúrio. Tal planeta hipotético, denominado supostamente Vulcano, nunca veio a ser descoberto. O enigma só foi descoberto em 1915, quando Einstein completou sua Teoria Geral da Relatividade.

Princípio da equivalência de Einstein

A PEDRA fundamental desta teoria foi lançada em 1907, quando Einstein formulou seu princípio da equivalência. Este constitui um desenvolvimento do princípio estabelecido por Galileu de que todos os corpos, quaisquer que sejam suas massas, sofrem a mesma aceleração quando caem sob a influência de um campo gravitacional, sendo a implicação que a massa inercial e a massa gravitacional são exatamente iguais. A equivalência da massa gravitacional e inercial, como vimos no Capítulo 3, foi testada com uma precisão de cerca de parte em um bilionésimo. Por que estes dois tipos de massa devem ser iguais tem sido considerado um mistério; o fato de que elas são iguais e de que todos os corpos caem com a mesma velocidade em um campo gravitacional é às vezes denominado o princípio da equivalência *fraco*.

Einstein assinalou que um observador dentro de uma caixa fechada não poderia distinguir entre os efeitos da gravitação e os produzidos pela aceleração. Um observador em uma caixa sobre a superfície da Terra (Fig. 18) sentirá seu peso normal e notará que todos os corpos em queda livre sofrem uma aceleração em direção ao fundo da caixa exatamente igual. Se este observador estivesse colocado em uma caixa similar nas profundezas do espaço e se a caixa estivesse provida de um fo-

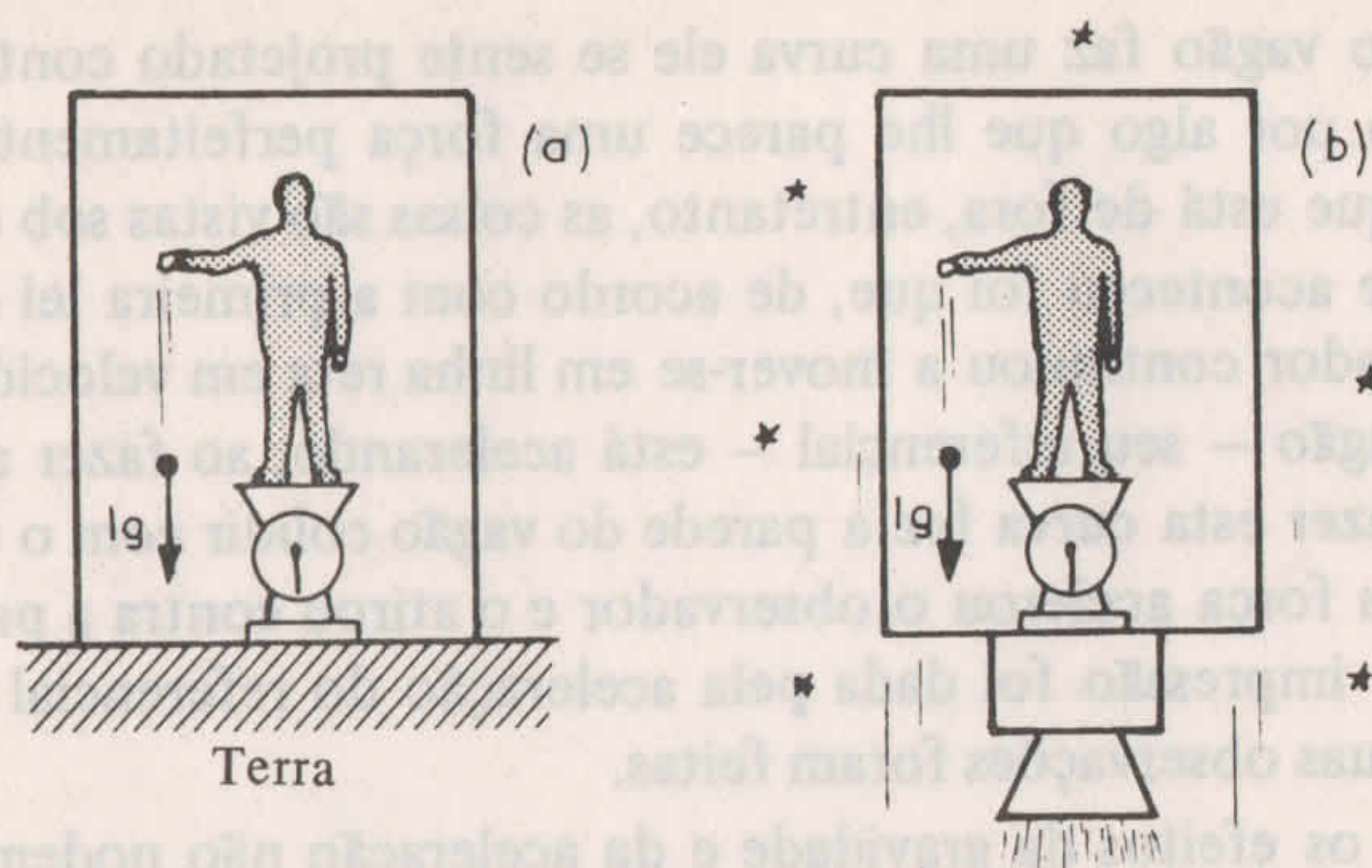



Fig. 18 Equivalência entre gravitação e aceleração. *Um observador em uma caixa fechada não pode dizer se (*a*) está parado sobre a superfície da Terra ou (*b*) está no espaço exterior, acelerando em velocidade uniforme, igual à aceleração devida à gravidade na superfície da Terra.*

guete capaz de acelerá-la continuamente em uma proporção exatamente igual à aceleração da gravidade sobre a Terra* , ele novamente acharia que todos os objetos em queda livre sofreriam uma aceleração igual para o fundo da caixa. Ele também acharia seu peso normal. Não existe qualquer observação ou experiência que ele pudesse fazer dentro dos limites de sua caixa fechada que lhe pudesse informar se os efeitos observados se deviam à gravidade ou à aceleração. Dentro de uma pequena caixa fechada os efeitos da gravidade e da aceleração não podem ser distinguidos.

A gravidade, neste contexto, comporta-se como uma força *inercial*, uma força "fictícia" que surge em virtude da aceleração do referencial em relação ao qual as observações estão sendo feitas. O exemplo mais familiar de uma força inercial é a "força centrífuga". Se um observador dentro de um vagão fechado está sendo transportado ao longo de uma ferrovia reta em velocidade constante, não se dá conta de quaisquer forças (a não ser seu próprio peso) atuando sobre ele. Entretanto,

* Objetos que caem livremente próximo à superfície da Terra aceleram-se numa taxa de aproximadamente 9,8 metros por segundo, a cada segundo; assim, após 1 segundo um corpo terá alcançado uma velocidade de 9,8 metros por segundo, após 2 segundos, 19,6 metros por segundo, e assim sucessivamente. Essa figura é conhecida como aceleração devido à gravidade e é representada pelo símbolo *g*.

quando o vagão faz uma curva ele se sente projetado contra a parede do vagão por algo que lhe parece uma força perfeitamente real. Para alguém que está de fora, entretanto, as coisas são vistas sob outro ângulo. O que aconteceu foi que, de acordo com a primeira lei de Newton, o observador continuou a mover-se em linha reta em velocidade uniforme. O vagão – seu referencial – está acelerando, ao fazer a curva, e o ato de fazer esta curva fez a parede do vagão colidir com o observador. Nenhuma força acelerou o observador e o atirou contra a parede do vagão; esta impressão foi dada pela aceleração do referencial em relação ao qual suas observações foram feitas.

Se os efeitos da gravidade e da aceleração não podem ser distinguidos, existe sentido em encarar a gravidade como uma "força aparente"?

Imaginemos novamente uma caixa fechada – num elevador, desta vez (Fig. 19). Se o cabo que o sustenta se partisse, o elevador e seu con-

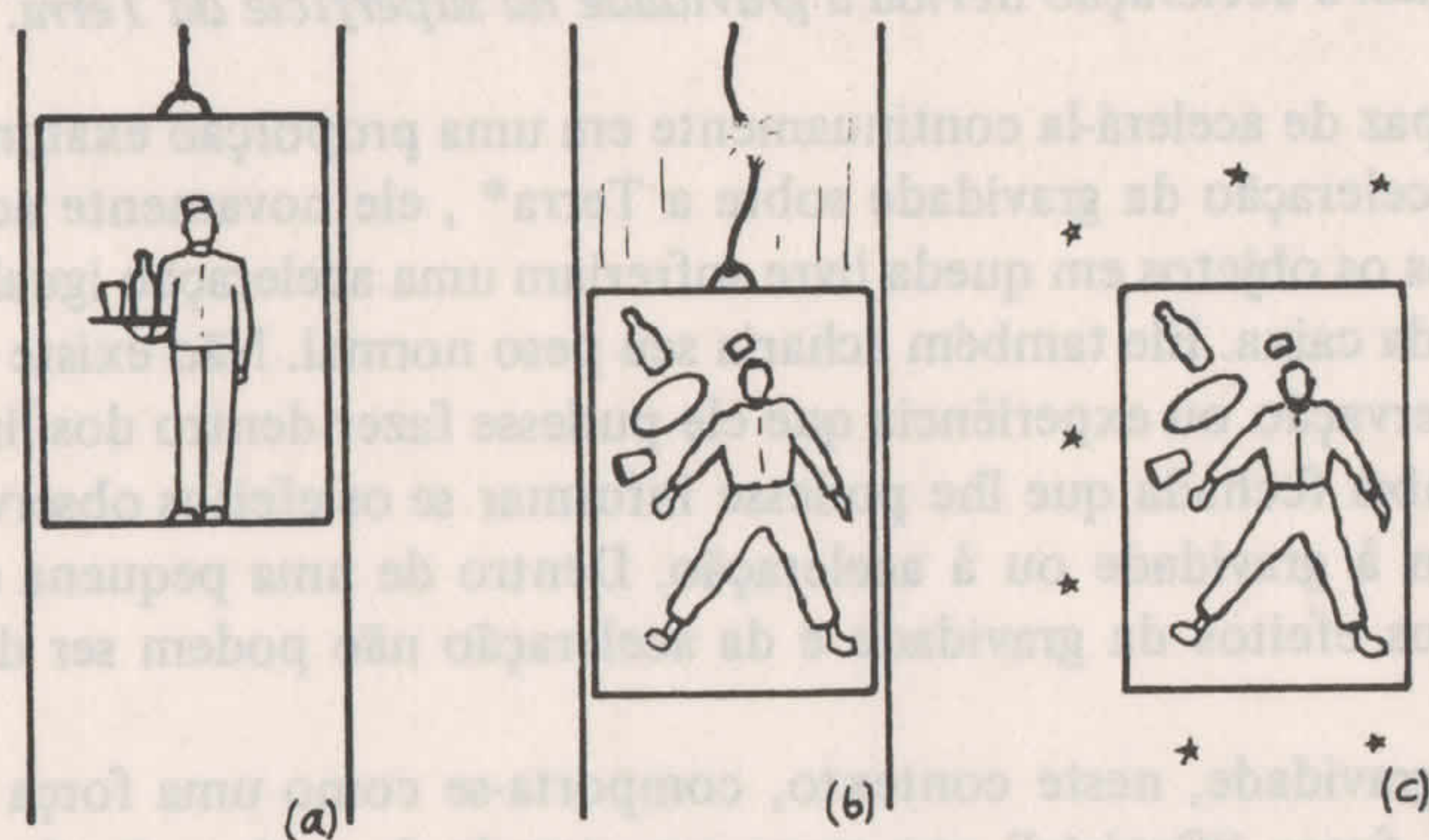



Fig. 19 Queda livre. *O observador, contido em um elevador estacionário, pesa 70 kg (*a*). Se o cabo se parte, o elevador e seu conteúdo caem livremente sob a atração do campo gravitacional da Terra (*b*); como o elevador e tudo dentro dele estão sofrendo a mesma aceleração, o observador não se sente mais pressionado contra o chão pela gravidade e assim experimenta a sensação da imponderabilidade. Não há nenhum meio para o observador afirmar, através das experiências realizadas dentro da caixa (elevador) se está caindo pelo poço do elevador ou flutuando livremente no espaço, longe da influência gravitacional da Terra (*c*).*

teúdo cairiam livremente sob a influência da gravidade, exatamente com a mesma aceleração. O observador não sentiria mais qualquer sensação de peso e os objetos largados dentro do elevador flutuariam livremente sem qualquer tendência a acelerar em direção ao chão do elevador. Todas as coisas dentro do elevador ficariam sem peso. Do ponto de vista de um observador externo, todas as coisas contidas no elevador estariam sendo aceleradas exatamente na mesma proporção que o próprio elevador e não haveria qualquer aceleração do conteúdo relativa ao chão do elevador. O observador dentro do mesmo seria inteiramente incapaz, através de qualquer experiência dentro do elevador, de dizer se estava caindo pelo poço do elevador ou flutuando livremente no espaço.

Através destes exemplos vemos que os efeitos da gravidade podem ser criados ou eliminados escolhendo-se um referencial adequado.

A lei do movimento, de Newton, funcionaria bem dentro de uma caixa em queda livre. Quando um corpo fosse posto em movimento, por exemplo, continuaria neste estado de movimento (até bater na parede da caixa) de acordo com a primeira lei. É fácil ver que as outras duas leis seriam igualmente obedecidas. A caixa em queda livre, então, constitui um referencial inercial *local*: dentro dos limites da caixa todas as condições necessárias para definir um referencial inercial (Capítulo 3) são encontradas. O princípio da equivalência de Einstein estabelecia não apenas que dentro de caixas fechadas os efeitos da gravitação e da aceleração são indiferençáveis mas também todas as leis da natureza têm a mesma forma dentro de caixas em queda livre que teriam em qualquer referencial inercial. Nesta formulação, denominada por alguns autores como o princípio da equivalência *forte*, a implicação é que todas as caixas em queda livre são equivalentes para a realização de todas as experiências físicas.

É importante observar que o princípio de equivalência só é válido dentro de pequenos volumes de espaço suficientemente pequenos para que a gravidade possa ser encarada como constante. Se a caixa for muito grande, serão observados efeitos gravitacionais – o assoalho da caixa em queda livre em direção à Terra estaria mais próximo do centro da Terra do que o teto da caixa e assim uma partícula liberada próximo do teto da caixa aceleraria menos rapidamente do que outra liberada perto do chão; em conseqüência as duas partículas se afastariam lentamente uma da outra. Einstein estendeu o conceito de referencial inercial até abranger todo e qualquer laboratório em queda livre e removeu do conceito sua associação tácita ao espaço absoluto (do ponto de

vista de Newton um referencial inercial seria aquele que se movesse em movimento uniforme em relação ao espaço absoluto) ou ao referencial constituído pelas galáxias distantes. Também restringiu o conceito ao uso local: como os efeitos da gravidade estão presentes em todos os pontos do Universo e a intensidade da gravidade difere de lugar para lugar dependendo da distribuição da matéria, em grandes referenciais em queda livre os efeitos diferenciais – tais como o efeito gravitacional mencionado acima – tornar-se-ão aparentes e tais diferenciais não poderão ser encarados como realmente inerciais (corpos inicialmente em repouso se afastarão, contradizendo a primeira lei de Newton).

Conseqüências do princípio da equivalência

SE OS EFEITOS da gravitação e da aceleração são indiferençáveis, então os raios da luz devem ser desviados em um campo gravitacional e a luz que atravessa um campo gravitacional deveria desviar-se para o vermelho. Consideremos estes fenômenos.

Imaginemos outra vez o nosso azarado observador dentro de um elevador em queda livre. Pelo princípio da equivalência, nenhum efeito da gravidade estaria aparente para esse observador, de tal forma que se ele atira uma bola em direção à parede oposta ela percorrerá uma linha reta (Fig. 20). Em relação aos observadores situados do lado de fora, o elevador está acelerando para baixo e assim sendo a bola parece cair com ele, descrevendo uma trajetória parabólica tal como qualquer projétil disparado acima da superfície da Terra.

Se, em vez da bola, o observador projetar um feixe de luz através da cabina, ela também seguirá uma trajetória reta dentro do elevador. Do ponto de vista externo, aquele raio de luz seguiria uma trajetória curva uma vez que, durante o tempo transcorrido para atravessar o elevador, embora muito pequeno, este último teria caído certa distância através do poço. A curvatura seria muito pequena, uma vez que a velocidade da luz é muito grande, mas sem dúvida alguma a trajetória do raio de luz seria curva.

A conclusão a ser tirada do princípio da equivalência é que os raios de luz devem ser desviados ao passarem próximos a corpos possuidores de grande massa. De fato, a equivalência entre massa e energia que emerge da Teoria Especial sugere que a luz deve ser afetada pela gravi-

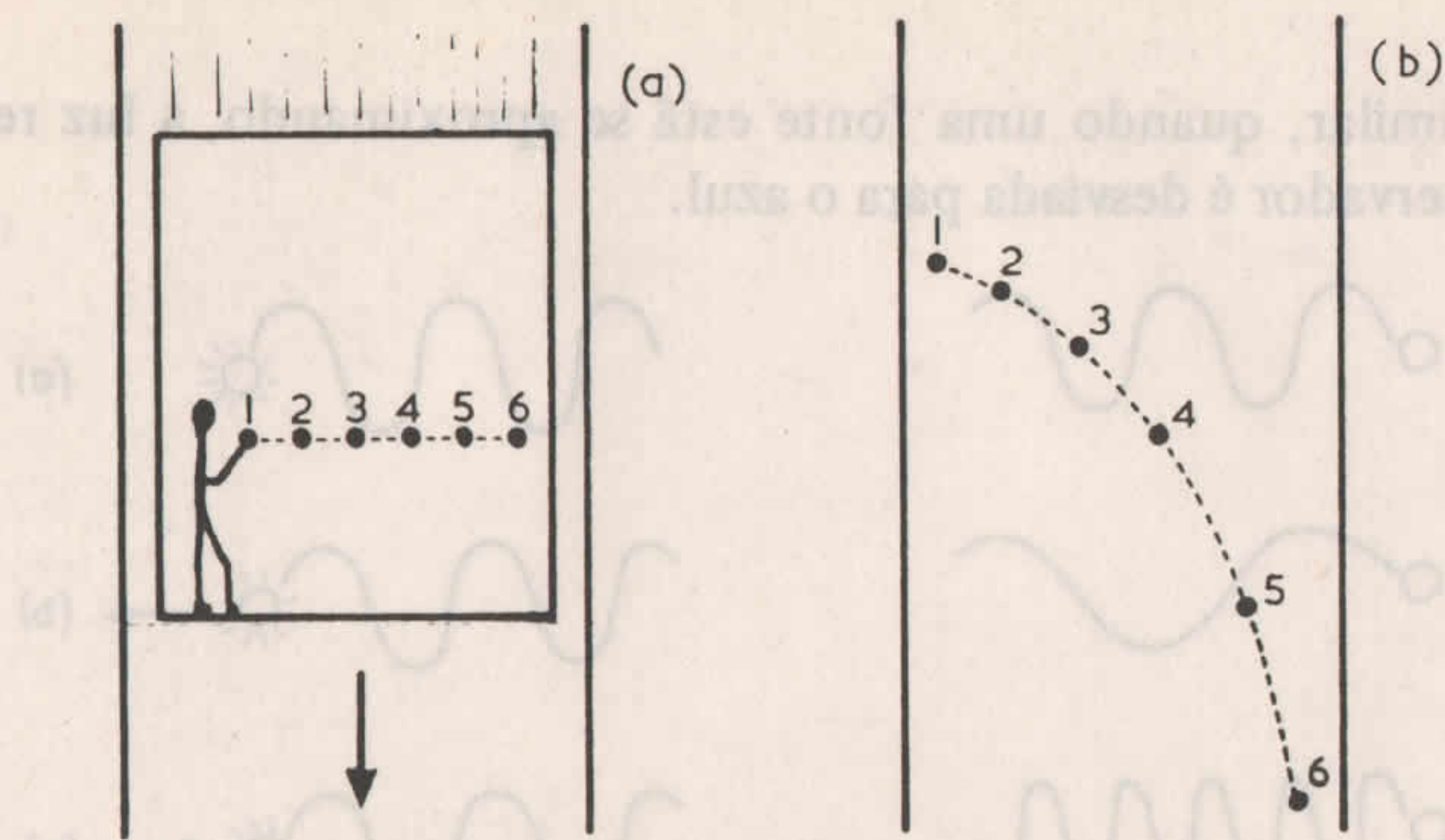



Fig. 20 A relatividade da queda livre. *(a) Se o observador dentro da caixa em queda livre atira uma bola em direção à parede oposta, ela percorrerá uma linha reta de acordo com o seu esquema de referência. (b) Para um observador externo, "estacionário", o elevador e o seu conteúdo estão sendo acelerados para baixo sob a influência da gravidade: igualmente, de acordo com seu ponto de vista, a bola seguirá a trajetória parabólica associada ao movimento de um projétil no campo gravitacional da Terra (ver Fig. 9).*

dade tal como a matéria e, por isso, este resultado não deve ser tão surpreendente. Como veremos, a curvatura da luz pela gravidade foi confirmada mediante experiência.

Em 1842, o físico austríaco Christian Doppler (1803-1853) demonstrou que o movimento de uma fonte de ondas sonoras afetaria a freqüência das ondas (o timbre) recebidas por um observador "fixo". Todos nós estamos familiarizados com o fato de que, quando uma fonte de som como uma sirena montada sobre um veículo em movimento está se aproximando de nós, o timbre do som emitido é significativamente mais alto do que quando a fonte está se afastando.

De acordo com o *efeito Doppler*, quando uma fonte de luz está se afastando do observador o número de cristas de onda por segundo que ele recebe (isto é, a freqüência) será menor do que o número que ele receberia se esta fonte estivesse estacionária em relação a ele. Com efeito, as ondas de luz são "esticadas" por causa da recessão da fonte (Fig. 21) e assim o comprimento de onda percebido é mais longo. Uma vez que a luz vermelha corresponde à extremidade das ondas longas do espectro visível, este efeito é chamado *desvio para o vermelho*. De

forma similar, quando uma fonte está se aproximando, a luz recebida pelo observador é desviada para o azul.

(a)

(b)

(c)

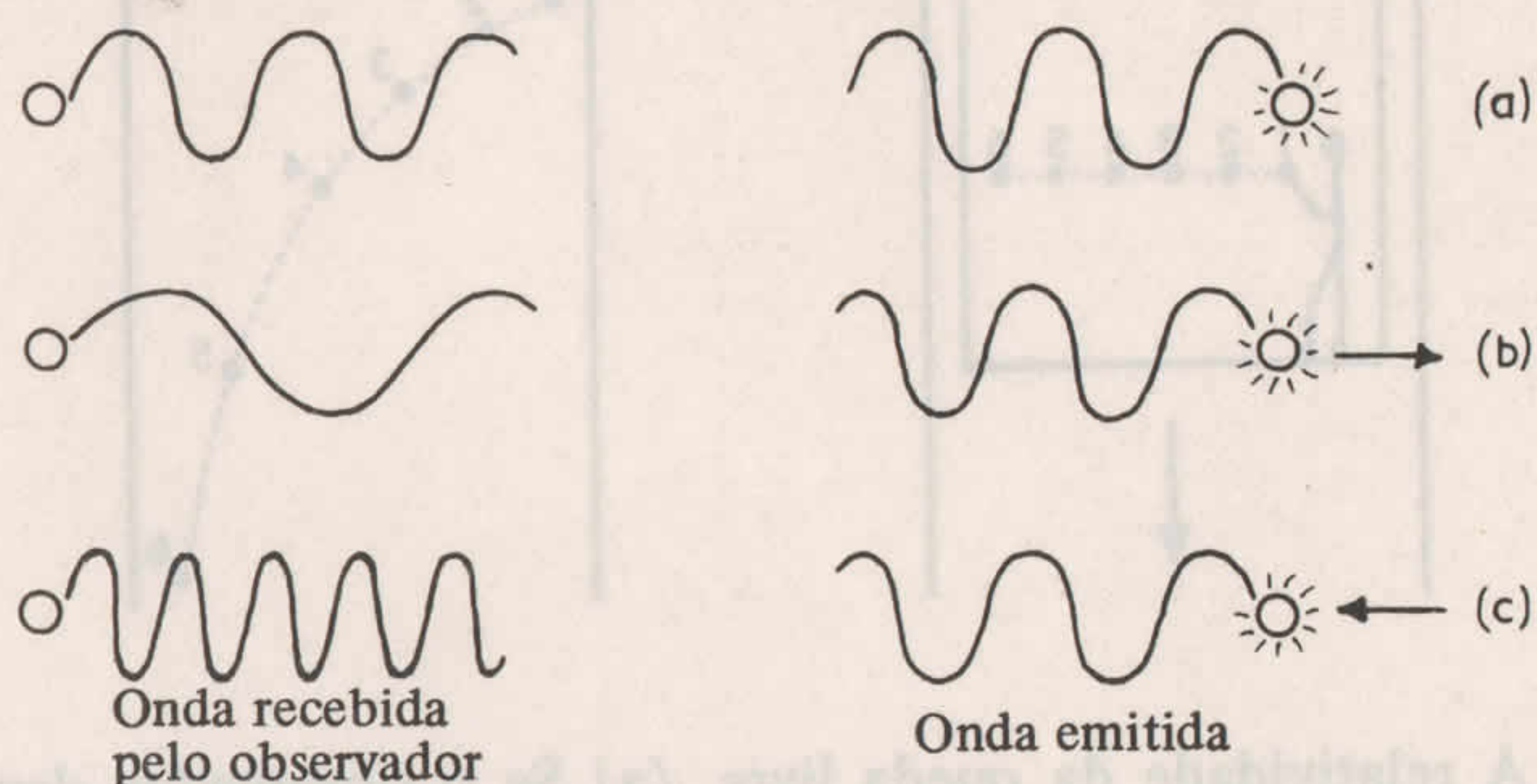
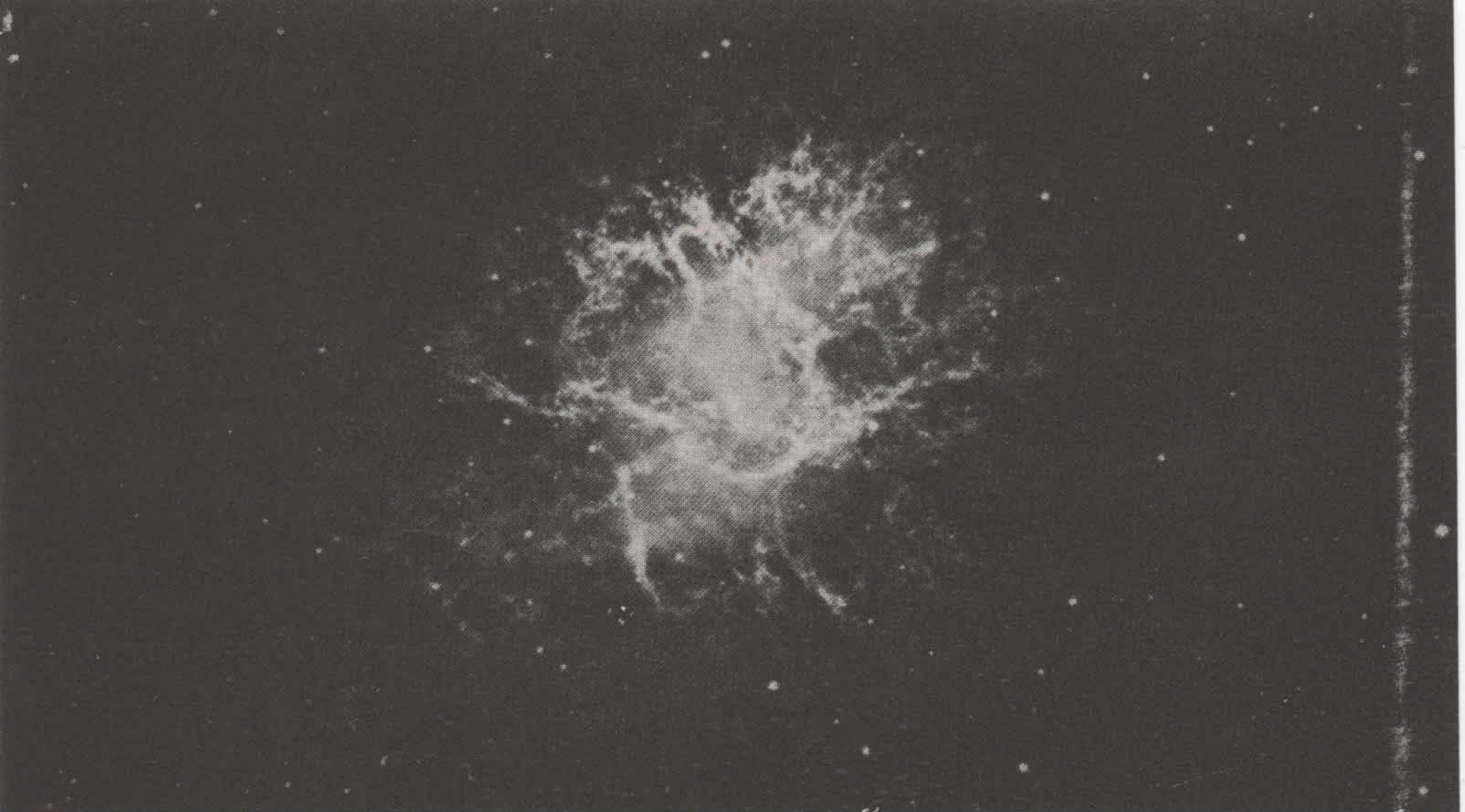
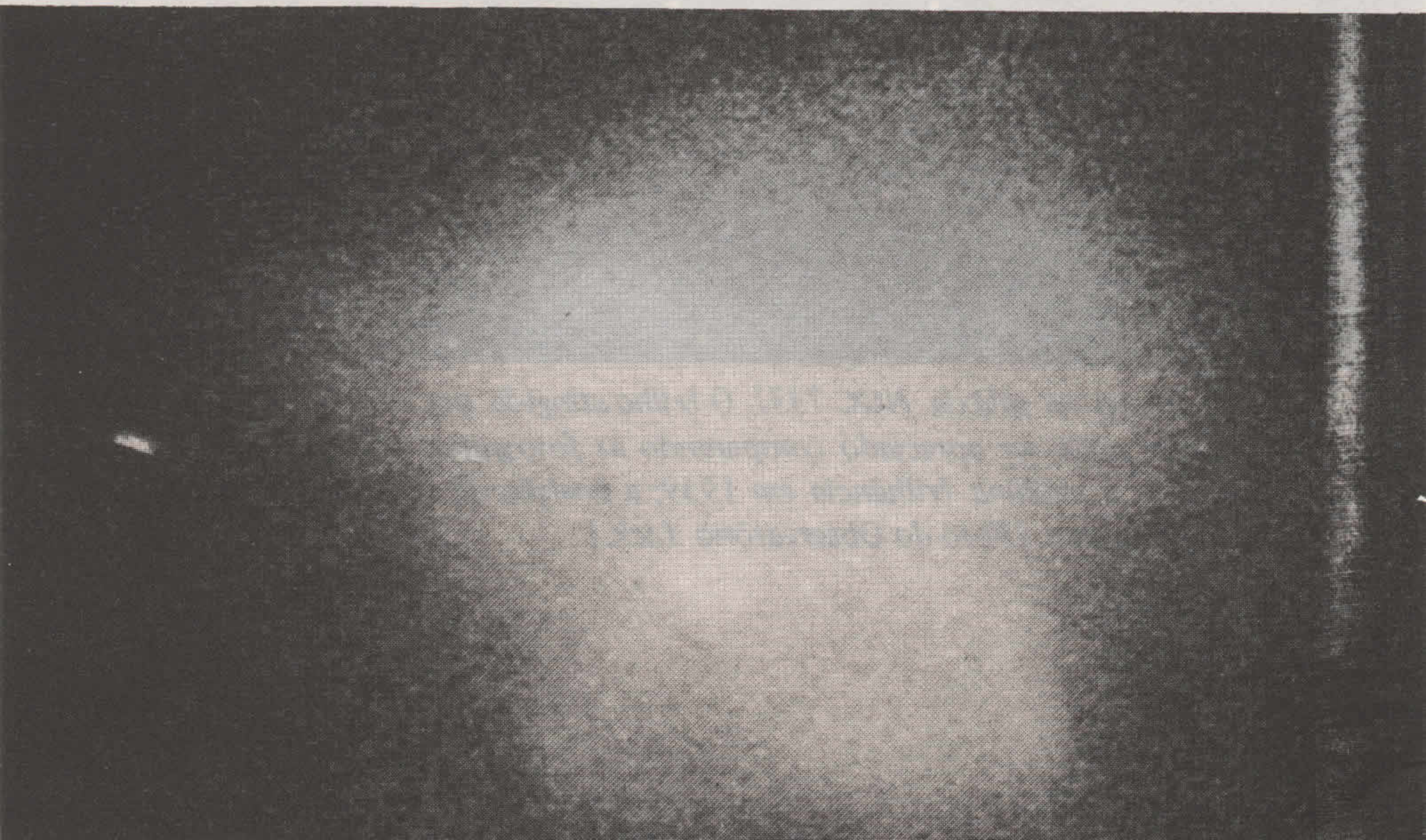
Onda recebida pelo observador

Onda emitida

Fig. 21 O efeito Doppler. (a) *Um raio de luz recebido por um observador de uma fonte estacionária com respeito a ele chegará com o mesmo comprimento da onda emitida.* (b) *Se a fonte está se afastando do observador, cada sucessiva crista de onda é emitida de uma distância ligeiramente maior do que a precedente e assim leva um pouco mais de tempo para atingir o observador: igualmente o número de cristas de ondas por segundo que atinge o observador é menor do que o número emitido pela fonte e o comprimento de onda percebido é maior do que o comprimento de onda emitido.* (c) *Inversamente, se a fonte está se aproximando do observador, as ondas de luz são "encolhidas" e o comprimento de onda é mais curto do que o comprimento emitido.*

Como o físico francês A. H. Fizeau (1819-1896) mostrou em 1848, este efeito resultaria em uma mudança de comprimento da onda das linhas de emissão ou absorção presentes no espectro de uma estrela que esteja se aproximando ou se afastando de um observador, sendo a mudança de comprimento de onda ($\Delta\lambda$) comparada com o "verdadeiro" comprimento de onda (λ) dependente da velocidade (v) da fonte em relação ao observador. O desvio para o vermelho é definido como $\Delta\lambda/\lambda$ e, no tocante a velocidades que não constituam uma grande fração da velocidade da luz (c), é igual a v/c (ou o desvio para o azul) e podem determinar a velocidade de recessão (ou aproximação) da fonte.

O princípio da equivalência mostra que um desvio para o vermelho também ocorreria na luz que se mova através de um campo gravitacional. Consideremos nosso observador no elevador em queda livre. Se ele emite um raio de luz para cima, a partir do chão, pelo princípio

Supernova na galáxia NGC 7331. O brilho atingido por uma supernova isolada pode ser apreciado comparando as fotografias tiradas antes e durante a máxima brilhância em 1959; a posição da supernova é indicada pela seta. (Foto do Observatório Lick.)

A nebulosa do Caranguejo. Esta nuvem de gás em expansão, fonte de todas as espécies de radiação eletromagnética, desde os raios X até as ondas de rádio, é o remanescente de uma supernova (estrela que explodiu), que ocorreu no ano de 1954. No centro deste objeto luminoso está um pulsar, alimentado por uma estrela-nêutron em rotação e "piscando" cerca de 30 vezes por segundo. (Fotografia do Observatório de Palomar, Instituto de Tecnologia da Califórnia.)

Radiografia da nebulosa do Caranguejo obtida pelo Observatório Einstein (HEAO 2) em 1979. O objeto brilhante no centro é o pulsar, que está transferindo energia para o meio circundante. (Cortesia da NASA.)

da equivalência nada ocorrerá com este feixe de luz que indique a ele que a cabina está caindo através do poço ao invés de estar flutuando livremente no espaço. Entretanto, para um observador fixo olhando para o fundo do poço do elevador, a fonte de luz estará se afastando e assim ele receberá uma luz desviada para o vermelho. A conclusão a ser tirada daí é que a luz que se move para cima através de um campo gravitacional será desviada para o vermelho (a luz que se move para baixo será desviada para o azul).

Tempo-espaço curvos

O OUTRO elemento-chave na formulação da relatividade geral era o conceito tempo-espaço curvos. O tempo-espaço de Minkowski, que era o tempo-espaço da Relatividade Especial, era *plano*: a menor distância entre dois pontos era uma linha reta, e os ângulos de um triângulo somados é igual a 180°. Como vimos, a luz é a entidade que se move mais rapidamente no Universo, mesmo quando ela é dirigida para passagens curvas em presença de matéria. Uma vez que os efeitos gravitacionais da matéria estão presentes, embora debilmente, em todos os pontos do Universo, nenhuma partícula, seja um fóton de luz ou um pedaço de rocha, pode seguir uma trajetória realmente reta no espaço. As partículas de matéria estão sujeitas a acelerações à medida que passam por corpos portadores de massa, naturalmente as linhas de universo das partículas aceleradas são curvas.

Já vimos que é possível produzir ou eliminar os efeitos da gravidade escolhendo um referencial adequado e isto nos faz suspeitar que a natureza da gravidade é a mesma de uma "força". Suponhamos que o efeito da matéria constituísse uma distorção da geometria do espaço de tal forma que, nas imediações da matéria, o espaço-tempo não fosse mais reto, porém curvo. Se assim fosse, a mais curta distância entre dois pontos não seria uma linha reta e as trajetórias dos raios e das partículas próximos da matéria seriam curvos. Em tal concepção, a gravitação não seria uma força agindo diretamente entre massas individuais. Ao invés, o que consideramos uma força gravitacional decorreria simplesmente da geometria do espaço-tempo.

Embora isto possa parecer uma forma peculiar de encarar a realidade, é fácil estabelecer uma analogia capaz de nos ajudar. Imaginemos

duas criaturas retas vivendo na superfície de uma esfera (Fig. 22). Temos de imaginar que essas criaturas são realmente retas – criaturas bidimensionais que podem se mover para a frente, para trás, para a esquerda e para a direita, mas para as quais a direção vertical não tem qualquer significado (nós as encontraremos novamente de vez em quando, uma vez que são bastante úteis). Suponhamos que estas duas criaturas, A e B, partem com a mesma velocidade ao longo de trajetórias paralelas perpendiculares ao "equador" de sua esfera, começando a partir de pontos diferentes sobre esse equador. Temos de admitir que estas criaturas,

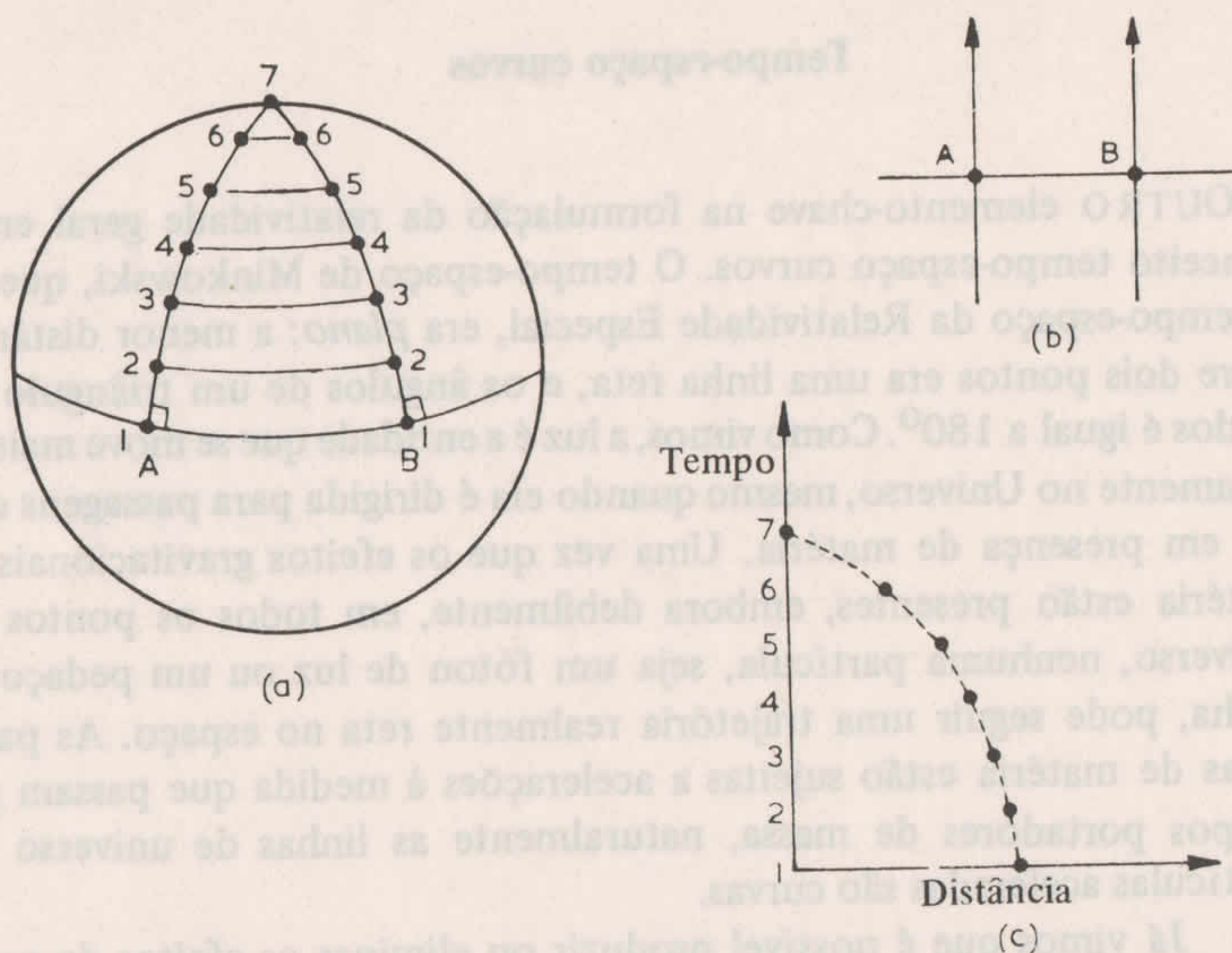



Fig. 22 "Forças" geométricas sobre a superfície de uma esfera. (a) *Duas criaturas retas, A e B, percorrendo trajetórias paralelas, perpendiculares ao equador da esfera sobre a qual vivem* – (b) *por definição, suas trajetórias são paralelas, uma vez que fazem ângulos iguais com o equador. A e B eventualmente se encontram no pólo, sendo mostradas suas separações em sete diferentes pontos. Do ponto de vista de A, B está sendo acelerado em sua direção* (c). *A e B podem concluir que uma força de atração os reuniu (pois a direção vertical não tem nenhum significado para eles), mas nós, como observadores exteriores, podemos ver que sua aproximação resultou simplesmente da geometria do "universo" no qual estão localizados.*

sendo elas mesmas retas, admitem que seu "universo" seja reto também e obedeça às leis da geometria euclidiana – certamente elas não poderiam visualizar a aparência de uma esfera.

À medida que progridem em suas jornadas, A e B descobrem que, lentamente a princípio e em seguida mais depressa, estão se aproximando inexoravelmente até colidirem um com o outro no "pólo norte" de seu universo. Se, visando evitar a colisão, cada um deles procurasse exercer uma força dirigida para longe um do outro, poderiam concluir, de forma bastante razoável, que estão sendo impelidos um para o outro por uma força, força essa que poderia escolher ou chamar de "gravidade". Seria confuso levar a analogia longe demais, mas isto demonstra como o efeito geométrico pode dar lugar a um fenômeno que parece ser uma força.

A geometria do espaço positivamente curvo (o espaço curvo, *grosso modo*, como a superfície de uma esfera) foi investigada pela primeira vez em 1854 pelo matemático alemão G. F. B. Riemann (1826-1866). Em tal espaço não poderiam existir linhas verdadeiramente "paralelas"; todos os pares de linhas iriam eventualmente se encontrar (tal como, por exemplo, as linhas indicadoras da longitude sobre a superfície da Terra, ou seja, os meridianos, se encontram nos pólos). Tal como sobre a superfície de uma esfera, no espaço positivamente curvo os ângulos de um triângulo, somados, dão um resultado maior do que 180°. No espaço curvo, a "distância mais curta" entre dois pontos é uma trajetória curva conhecida como uma *geodésica*.

Os navegadores sobre a Terra estão familiarizados com o fato de que a distância entre os dois pontos da superfície de uma esfera não é uma reta. A rota mais curta de A para B é seguir um *grande círculo* – isto é, um círculo cujo centro é também o centro da Terra; em contraste, um *pequeno círculo*, tal como um "paralelo" de latitude, situa-se em um plano que não passa através do centro da Terra. A distância mais curta entre dois pontos amplamente separados que se localizam na mesma latitude acha-se ao longo da grande rota circular entre estes pontos e não ao longo do círculo de latitude sobre os quais eles estão localizados. À guisa de exemplo, para viajar ao longo de um círculo de latitude paralelo entre dois pontos de latitude de 60°N localizados em lados opostos da Terra envolve uma jornada de cerca de 10.000 km. Tomar a grande rota circular diretamente sobre o pólo envolve uma viagem de apenas 6.700 km.

Como o próximo passo crucial para a formulação da Teoria Geral da Relatividade Einstein propôs que o espaço-tempo (não apenas o espaço) seria curvo na presença de corpos possuidores de grande massa e que os raios e as partículas materiais percorreriam o espaço-tempo da forma mais eficiente possível — ao longo de trajetórias geodésicas. A gravitação resulta da geometria do espaço-tempo na vizinhança dos corpos. As trajetórias dos fótons e das partículas materiais semelhantes de-

(a)

(b)

(c)

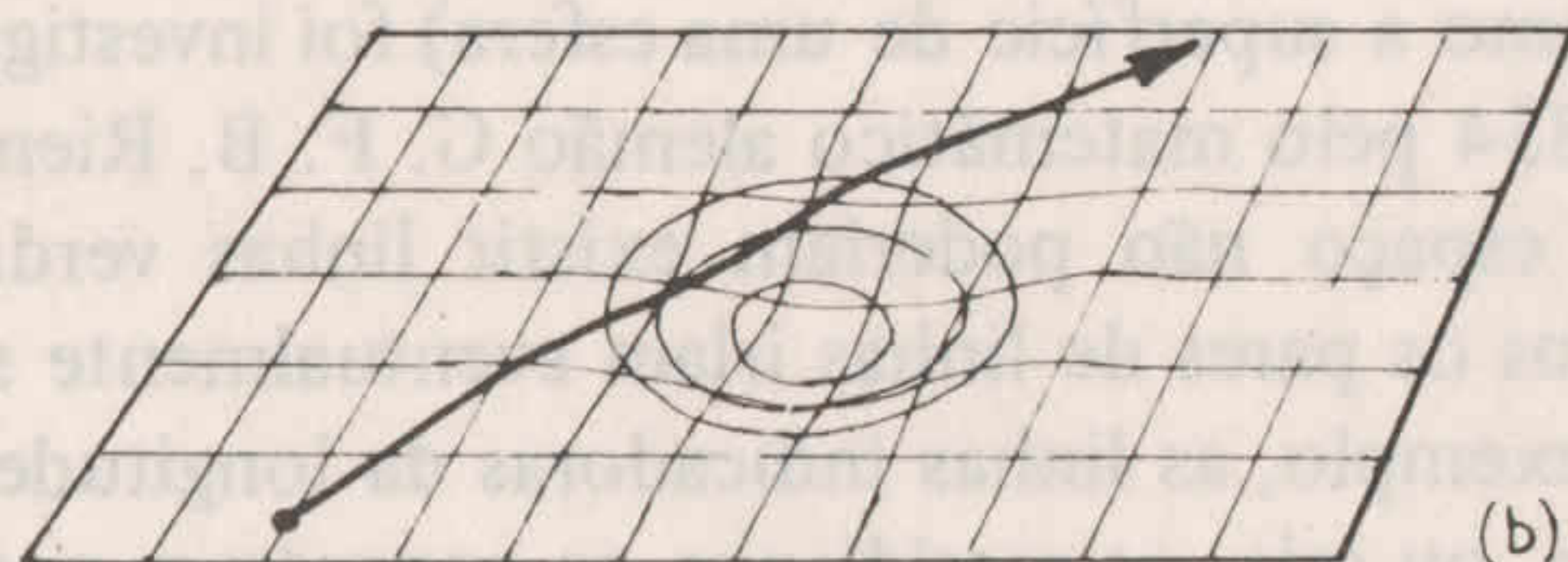
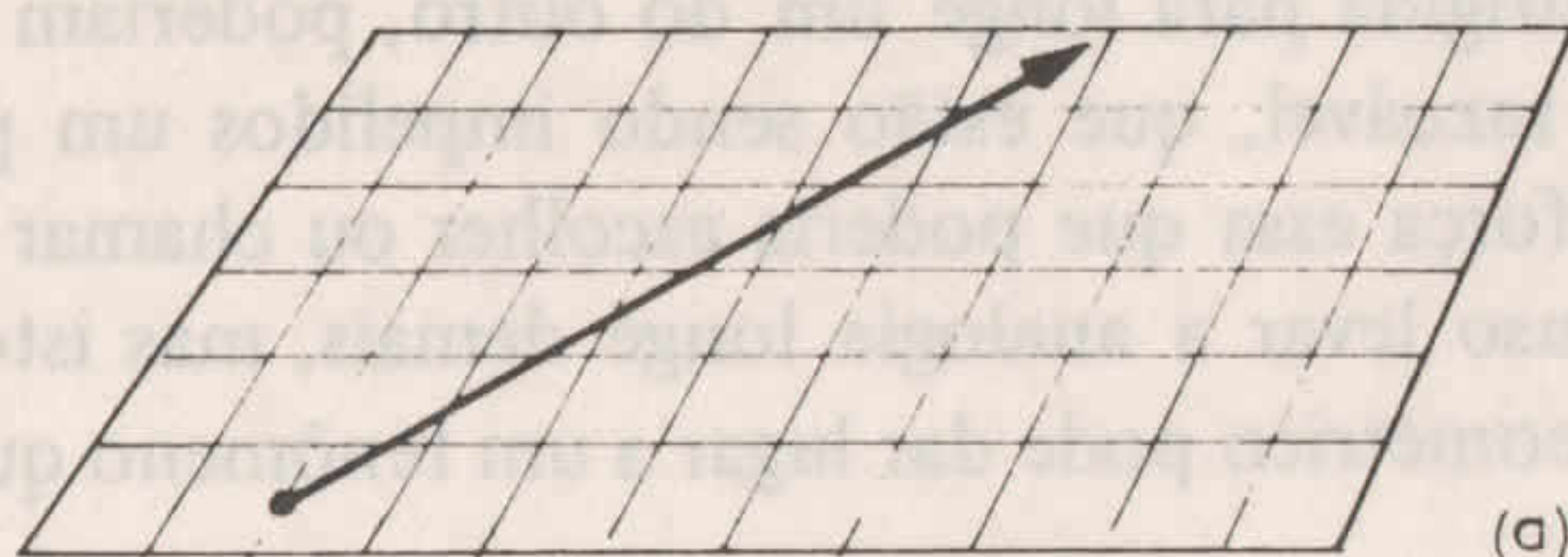



Fig. 23 A analogia da lâmina de borracha. *Imaginemos que o espaço-tempo seja uma lâmina de borracha.* (a) *Sobre uma superfície horizontal uma bola colocada em movimento percorrerá uma linha reta; da mesma forma, na ausência da matéria, o espaço-tempo é "plano" e as partículas e os raios seguem trajetórias retilíneas.* (b) *Quando um peso é colocado sobre a lâmina causa um afundamento que desvia o movimento de uma bola; igualmente o efeito de uma quantidade de matéria é distorcer o espaço-tempo de tal forma que os raios e as partículas sigam trajetórias curvas.* (c) *Um peso maior causa um afundamento maior; da mesma forma um corpo de maior massa produz uma distorção maior do espaço-tempo (isto é, possui um campo gravitacional mais poderoso).*

pende da curvatura do espaço-tempo no qual estão se movendo. Um planeta viaja em sua órbita ao redor do Sol não apenas porque é obrigado a fazê-lo por uma força de atração que atua diretamente entre ele e o Sol, mas porque está respondendo à distorção do espaço-tempo na presença da massa do Sol.

Quanto maior e mais concentrada a massa do corpo, maior a curvatura do espaço-tempo em sua vizinhança e maior "a força" de gravidade experimentada pelos corpos aí localizados. Ao aumentar a distância de um corpo desta natureza, a curvatura do espaço se torna muito menor (e as "forças" gravitacionais recebidas correspondentemente mais fracas) e na ausência da matéria o espaço-tempo volta a ser reto.

O comportamento do espaço-tempo é muitas vezes ilustrado pela analogia da "lâmina de borracha". Na ausência da matéria o espaço-tempo pode ser representado por uma lâmina de borracha horizontal (Fig. 23) e uma bola atravessaria esta lâmina ao longo de uma trajetória retilínea. Quando um peso é colocado sobre a lâmina, produz um afundamento que desviará a bola de sua trajetória retilínea; um peso maior (representando uma grande massa) causa um afundamento maior, afetando a curvatura de uma grande área da lâmina de borracha e produzindo um desvio correspondentemente maior da bola. Uma bola com a velocidade adequada poderia permanecer em órbita no afundamento causado pelo grande peso, tal como o planeta permanece em sua órbita no espaço-tempo curvo em torno do Sol. Como todas as analogias, esta não deve ser levada longe demais, mas serve para ilustrar como as diferentes curvaturas do espaço-tempo associadas às diferentes massas afetariam as linhas de universo das partículas.

Teoria Geral da Relatividade

A TEORIA GERAL, publicada por Einstein em 1915, juntou todas as peças do quebra-cabeças. Incorporou o princípio da equivalência e o conceito de que o espaço-tempo é curvo na presença de corpos com grande massa – na verdade, foi o fato básico de que as forças gravitacional e inercial não podem ser distinguidas dentro de caixas fechadas que indicou a possibilidade de tratar a gravitação como um efeito da geometria do espaço-tempo ao invés de uma força atuando diretamente entre as massas dos corpos. A curvatura do espaço-tempo oriunda do campo gravitacional da matéria é calculada por meio das *equações de campo*

e as trajetórias dos raios de luz ou das partículas materiais no espaço-tempo curvo são obtidas resolvendo-se as *equações geodésicas*. Creio que foi o professor A. Wheeler quem primeiro descreveu a Relatividade Geral da forma mais sucinta, observando: "A matéria diz ao espaço como se curvar e o espaço diz à matéria como se mover".

A Relatividade Geral transformou radicalmente nossas idéias sobre o espaço, o tempo e a gravitação. Em vez de ser uma força que agia à distância, como na formulação de Newton, a gravidade foi absorvida pela geometria do espaço-tempo. Os corpos não são influenciados diretamente por forças; ao invés disso, eles respondem à curvatura do espaço-tempo em sua vizinhança. Qualquer mudança no campo gravitacional de um corpo não é comunicada instantaneamente, mas viaja através do campo à velocidade da luz de tal forma que, se o Sol fosse desintegrado no momento em que você lê estas palavras, ainda se passariam cerca de 8 minutos antes da Terra "dar-se conta" de que a "atração" gravitacional do Sol desapareceu.

Onde os campos gravitacionais são fracos, a Relatividade Geral e a gravitação newtoniana dão as mesmas respostas e fazem as mesmas previsões a respeito dos movimentos das partículas. Como a gravidade é uma força muito fraca, sob circunstâncias normais as diferenças entre as previsões das duas teorias são demasiadamente pequenas para serem detectadas. Entretanto, em fortes campos gravitacionais as diferenças se tornam aparentes e seria possível, através da observação ou da experiência, distinguir qual das duas teorias fornece a melhor descrição da Natureza.

Testes da Relatividade Geral

EXISTEM TRÊS testes "clássicos" da teoria. O primeiro deles refere-se ao avanço do periélio de Mercúrio, um efeito mencionado no início deste capítulo. Einstein verificou que de acordo com a sua teoria a órbita de um planeta que esteja se movendo ao redor do Sol na ausência de efeitos perturbadores devidos a outros planetas deveria ser uma elipse em uma lenta precessão. O efeito seria maior no tocante a Mercúrio e neste caso chegaria a 43 segundos de arco por século, um número exatamente igual à discrepância entre o movimento observado daquele planeta e o movimento previsto com base na teoria de Newton. Quando os efeitos perturbadores dos outros planetas foram incluídos no cálculo, a

Relatividade Geral explicou completamente o comportamento de Mercúrio.

Embora tenha sido um grande êxito para a teoria explicar uma discrepância conhecida desta forma, um teste mais marcante para o valor dela foi a previsão de efeitos que antes não haviam sido suspeitados. A Relatividade Geral foi bem-sucedida sob este aspecto de duas maneiras: a curvatura gravitacional da luz e o desvio gravitacional para o vermelho, ambos os quais, como já vimos, representam uma conseqüência do princípio da equivalência.

De acordo com a Relatividade Geral, um raio de luz que passe pelas imediações do Sol deveria ser desviado de um ângulo de cerca de 1,75 segundos de arco (Fig. 24): como as estrelas não podiam (naquela época) ser observadas próximas ao Sol durante o dia, este teste teve de ser realizado durante um eclipse total do Sol. A curvatura da luz de uma estrela foi examinada em 1919 durante o eclipse total de 29 de maio por uma expedição inglesa chefiada por Arthur Eddington (1822-

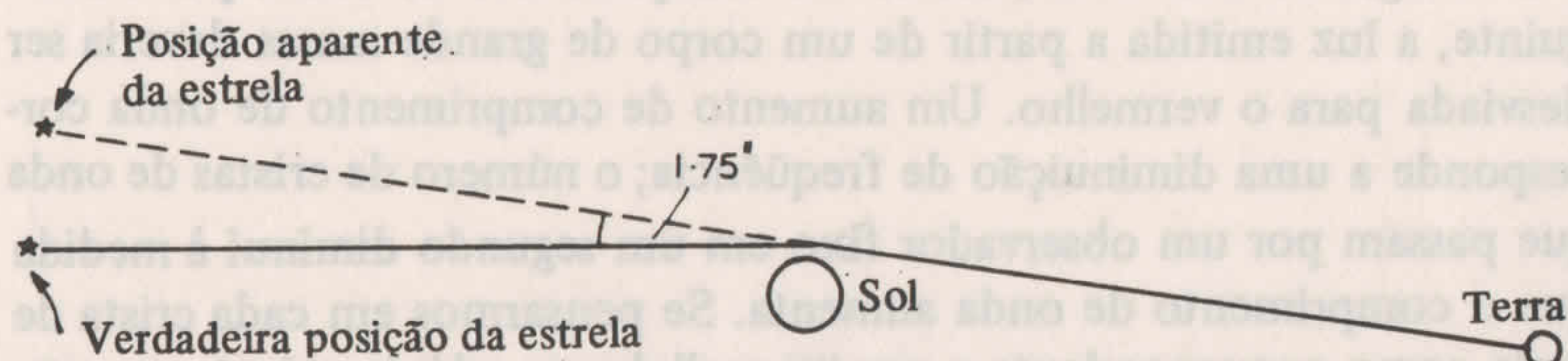



Fig. 24 Curvatura da luz pelo Sol. *De acordo com a Relatividade Geral, um raio de luz que passe próximo ao Sol deveria ser desviado de um ângulo de 1,75 segundo de arco. Observada da Terra, a estrela aparecerá desviada de sua posição normal de acordo com este ângulo.*

1944). A análise das chapas fotográficas obtidas pela expedição mostrou claramente que as posições estelares estavam realmente desviadas pelo campo gravitacional do Sol e o valor do deslocamento era de 1,98 ± 0,18 segundos, valor confortavelmente próximo da previsão de Einstein. Tendo sido obtidas logo após a publicação da teoria, estas medidas proporcionaram provas conclusivas a seu favor. Uma nova mensuração das chapas fotográficas originais realizadas em 1979 por G. M. Harvey, do Observatório Real de Greenwich, forneceu um valor de 1,87 ± 0,13, ainda em concordância maior com a previsão de Einstein.

Observações deste tipo foram realizadas durante muitos eclipses totais desde então e, embora as dificuldades inerentes tivessem levado a resultados variáveis, a curvatura da luz pelo Sol foi amplamente confirmada. O desenvolvimento de técnicas de interferometria na radioastronomia, mediante a qual os sinais recebidos por radiotelescópios amplamente separados podem ser combinados para fornecer medidas de posição muito precisas, permitiram que a curvatura das radioondas pelo Sol fosse medida com muito maior precisão. Todo ano o Sol passa perto de numerosas ondas de raios cósmicos como os quasares (veja Capítulo 10) 3C273 e 3C279 e observações em torno dos mesmos confirmaram a previsão de Einstein com uma margem de erro de apenas 1 por cento.

O terceiro teste refere-se ao desvio gravitacional para o vermelho, o qual, como vimos, decorre do princípio da equivalência. Podemos encarar este efeito de outra maneira. A luz que escapa do campo gravitacional de um corpo de grande massa tem de "esforçar-se" para escalar as paredes do poço gravitacional a fim de sair dele. Assim fazendo, perde energia e, como vimos no capítulo anterior, quanto mais baixa é a energia de um fóton, maior seu comprimento de onda: por conseguinte, a luz emitida a partir de um corpo de grande massa deveria ser desviada para o vermelho. Um aumento de comprimento de onda corresponde a uma diminuição de freqüência; o número de cristas de onda que passam por um observador fixo em um segundo diminui à medida que o comprimento de onda aumenta. Se pensarmos em cada crista de onda como correspondente a um "tique" de um relógio atômico, então a freqüência dos tiques de tal relógio seria reduzida em um forte campo gravitacional. O desvio gravitacional para o vermelho pode ser encarado como um efeito gravitacional de dilatação do tempo. Todos os relógios, naturais, biológicos e fabricados pelo homem funcionarão mais lentamente em um forte campo gravitacional do que em um fraco. O efeito é muito pequeno no caso de um corpo como a Terra: a velocidade de um relógio longe da Terra diferiria da velocidade de um relógio na superfície da Terra de apenas sete partes em 10 bilhões, isto é, o relógio localizado na Terra se atrasaria cerca de 20 segundos em 1.000 anos. Entretanto, como veremos nos capítulos seguintes, os efeitos em fortes campos gravitacionais podem ser realmente fantásticos.

Embora as medidas realizadas em 1925 pelo astrônomo norte-americano Walter Adams (1876-1956) demonstrassem um desvio para o vermelho na luz oriunda da companheira de Sirius, uma estrela muito densa, a primeira detecção realmente convincente do desvio para o ver-

melho e da dilatação do tempo produzidos pela gravitação foi obtida em 1960 por intermédio de uma engenhosa experiência realizada por R. V. Pound e G. A. Rebka, da Universidade de Harvard. Eles mediram os desvios de freqüência que ocorriam em fótons de raios gama viajando para cima e para baixo através de uma altura de 23 metros em uma torre do laboratório e verificaram que o desvio de freqüência concordava com as previsões de Einstein com uma precisão de cerca de 1 por cento. Várias experiências diferentes foram realizadas nos últimos anos para testar este efeito, tendo sido uma das abordagens mais interessantes o transporte de relógios atômicos de alta precisão ao redor do mundo em direções opostas, de tal forma que se pudessem separar os efeitos devidos à velocidade (Relatividade Especial) dos efeitos devidos à pequena redução de campo gravitacional experimentados pelos relógios em vôo a cerca de 10 km acima do solo (Relatividade Geral). Isto foi realizado pela primeira vez em 1971 por J. C. Hafele e R. E. Keating, embora a dilatação gravitacional do tempo neste caso particular só tenha sido confirmada com 10 por cento de precisão.

Uma experiência muito mais precisa foi realizada em 1976 por R. F. C. Vessot e M. W. Levine, do Centro de Astrofísica Harvard-Smithsoniano. Um relógio de hidrogênio foi enviado através de um foguete a uma altitude de cerca de 10.000 km e os sinais deste relógio, comparados com os sinais emitidos por relógios idênticos ao nível do solo. Embora a diferença esperada nas freqüências dos relógios fosse de apenas perto de 4,5 partes em 10 bilhões, os relógios mantiveram uma precisão, durante o período da experiência, de cerca de uma parte em 1.000 bilhões (isto é, 1 em 10^{15}). Embora a análise dos resultados se mostrasse uma tarefa demorada e difícil, por volta de 1978 os experimentadores estavam confiantes de que seus resultados concordavam com as previsões da Relatividade Geral até duas partes em 10.000.

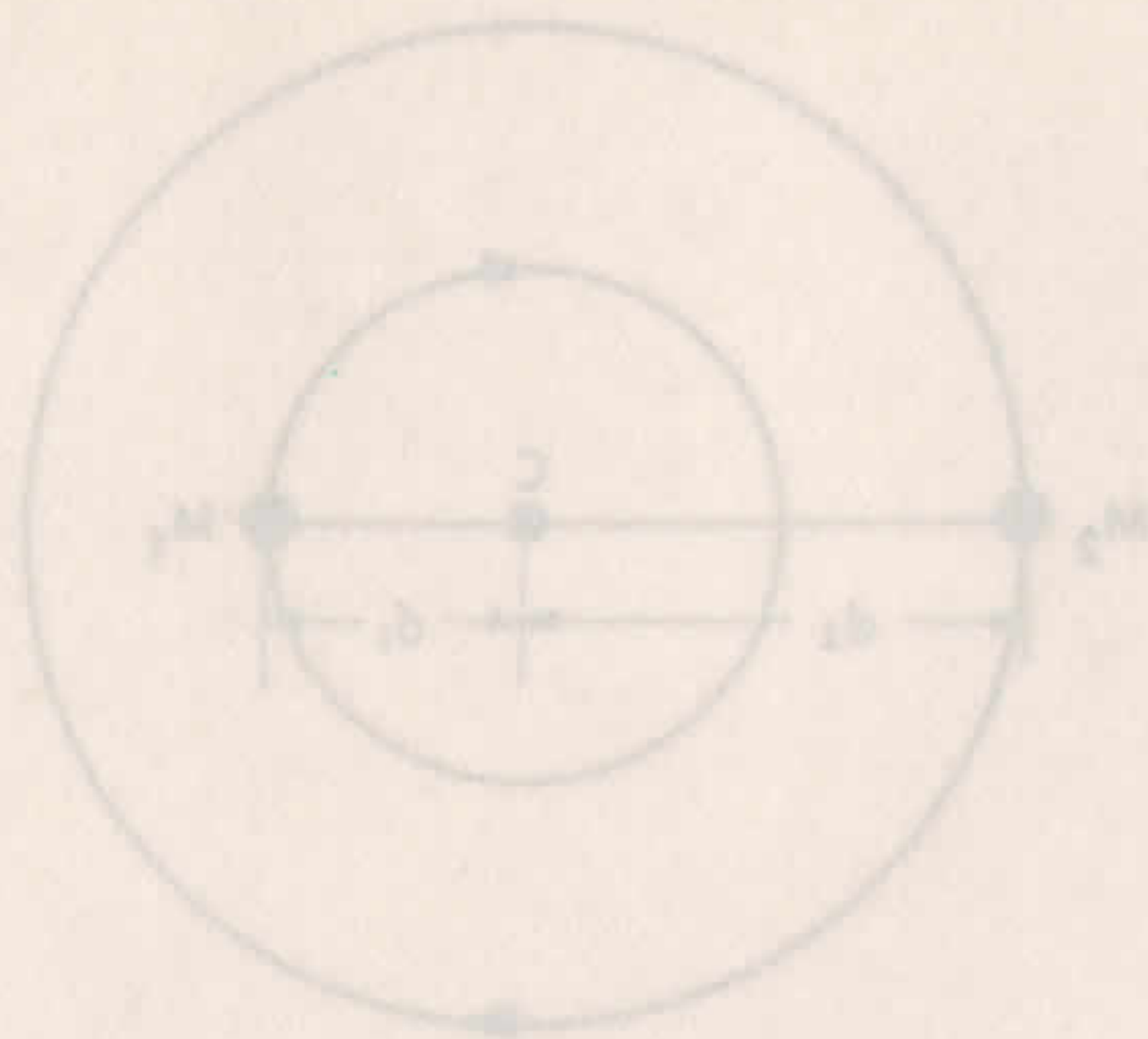
Em todos os testes até hoje a Relatividade Geral mostrou-se superior à teoria da gravitação de Newton, prevendo corretamente efeitos que não eram abrangidos pela teoria newtoniana. Numerosas teorias alternativas foram propostas desde 1915, mas nenhuma delas se mostrou superior à Relatividade Geral até agora e algumas foram eliminadas diante da evidência experimental. Mais tarde examinaremos algumas destas teorias, outros testes que foram imaginados para decidir entre elas e futuros testes aos quais a Relatividade Geral deverá ser submetida. Nesse momento, ela está firmemente estabelecida como a melhor teoria

disponível sobre a gravitação e assim permanecerá até o tempo em que deixe de explicar algum fato experimental.

Embora a Relatividade Geral se tenha mostrado superior à teoria de Newton no início do século XX, por muito tempo as pesquisas sobre a teoria gravitacional estagnaram. Em circunstâncias normais a gravidade é uma força tão fraca que os efeitos peculiares à Relatividade Geral não podem ser distinguidos e os físicos se baseiam na teoria gravitacional newtoniana para seus cálculos; afinal de contas, a teoria de Newton é muito mais fácil de utilizar. A Relatividade Geral só está no seu próprio ambiente ao lidarmos com o Universo em grande escala, ou com campos gravitacionais muito poderosos associados a corpos com grande concentração de massa. Durante as décadas de 60 e 70 os astrofísicos começaram a fazer observações sobre áreas que levaram a um súbito ressurgimento do interesse sobre a astronomia gravitacional. Por um lado, os astrônomos descobriram objetos que constituíam os remanescentes altamente comprimidos de estrelas maciças (estrelas-nêutrons) e começaram a reunir evidências favoráveis à possível detecção do último estado da matéria – os buracos negros. Por outro lado, as observações favoreceram claramente um tipo particular de teoria cosmológica, a teoria da Grande Explosão, segundo a qual o Universo originou-se mediante um grande evento explosivo há um determinado tempo finito atrás; e as observações estão atingindo um nível de sofisticação capaz de revelar o papel da gravidade na evolução do Universo como um todo. Além disso, foram descobertas categorias de galáxias e objetos peculiares tais como os quasares, que indicaram conter fontes de energia compactas, embora imensamente poderosas. Admite-se que muitas destas fontes envolvam campos gravitacionais tão poderosos que só a Relatividade Geral seria adequada para lidar com eles.

Subitamente, assim parece, os astrofísicos descobriram que precisam utilizar mais e mais a teoria de Einstein para lidar com os fenômenos que ocorreram nas profundezas do Universo. Inversamente, os astrofísicos estabeleceram o cenário para os novos testes da Relatividade Geral. Os resultados estão se mostrando muito excitantes.

PARTE DOIS

Gravidade, Buracos Negros e Universo

6
Gravidade e as estrelas

A PRIMEIRA tentativa bem-sucedida para demonstrar que as estrelas que constituem um binário gravitam de acordo com as leis de Kepler e as previsões da gravitação newtoniana foi feita em 1827 por Felix Savary (1797-1841).

As duas estrelas que constituem um binário movem-se ao redor de seu centro de massa comum sob suas atrações gravitacionais mútuas, mas muitas vezes se mostra conveniente encarar uma das estrelas como fixa e a outra percorrendo uma órbita elíptica ao redor dela. Pela teoria newtoniana encontramos que se considerarmos uma estrela, de massa M_1 fixa, a estrela companheira, de massa M_2, circulará ao redor de M_1 como se fosse um "planeta" movendo-se sob a influência de uma massa igual a $M_1 + M_2$ localizada na posição de M_1.

Se conhecemos o período orbital em anos (P) das estrelas, e a separação média em unidades astronômicas (a) das estrelas pode ser determinada, a massa combinada das duas estrelas – expressa em massas solares – é facilmente calculada pela simples expressão: $M_1 + M_2 = a^3/P^2$. Trata-se simplesmente da terceira lei de Kepler aplicada a dois corpos de grande massa ao invés do Sol e um planeta.

Para encontrar as massas isoladas das estrelas, é necessário encontrar as distâncias relativas d_1 e d_2 das massas M_1 e M_2 a partir do centro da massa do sistema (Fig. 25). Imagine uma barra de halterofilista com pesos desiguais em cada extremidade: se ele desejar equilibrá-la teria de segurá-la em um ponto mais próximo do peso maior. Exatamen-

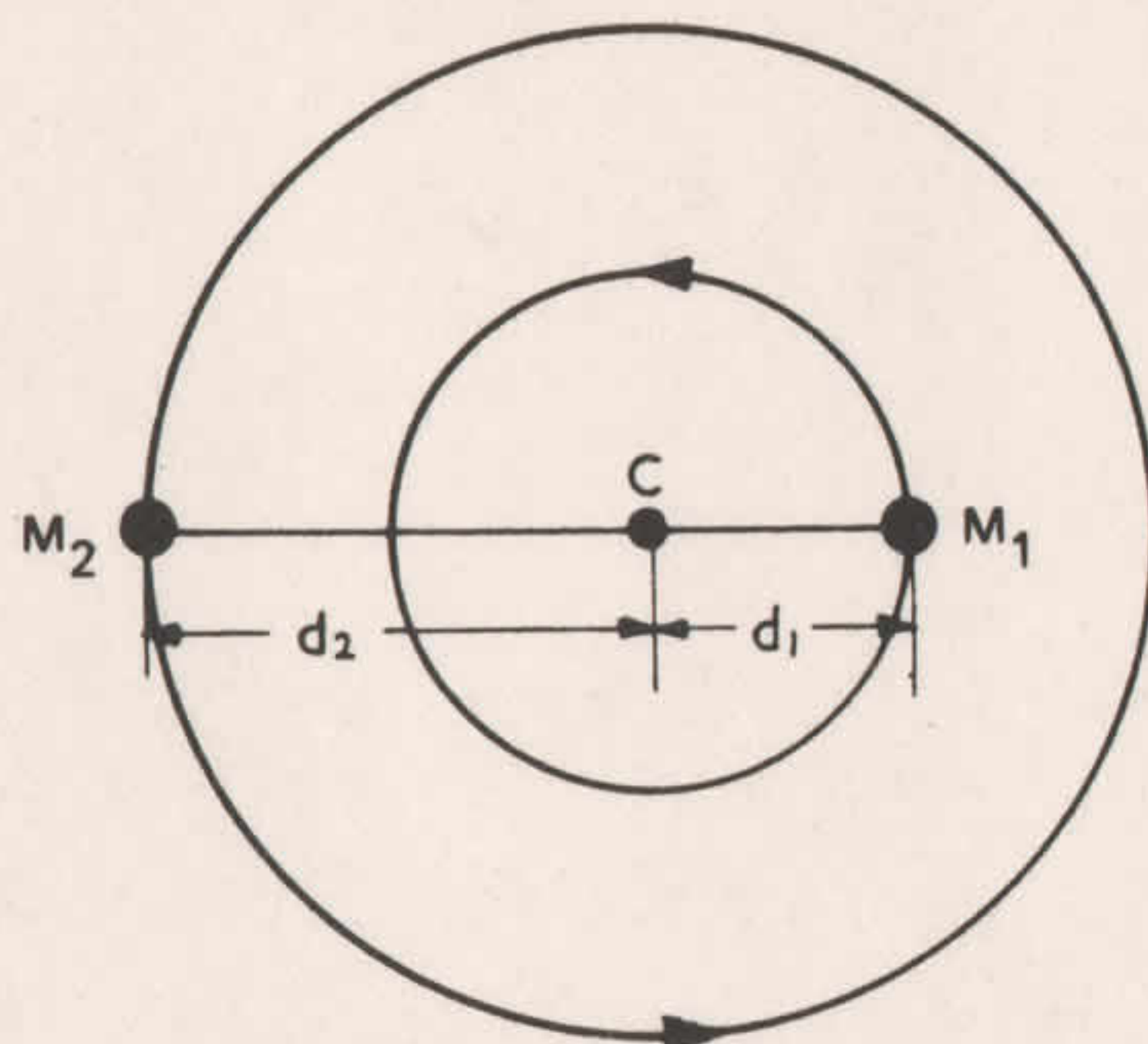



Fig. 25 Centro de massa de um binário. *Ambos os corpos,* M_1 *e* M_2*, evolvem a redor de seu centro de massa comum, C. Este se localiza mais perto do corpo possuidor de maior massa de tal forma que um* $d_1/d_2 = M_2/M_1$.

te da mesma maneira, verificamos que o raio das massas das duas estrelas em um binário é dado por $M_1/M_2 = d_1/d_2$. Conhecendo as massas combinadas e o raio das massas, as massas das estrelas isoladas podem ser calculadas. Este é o único método direto pelo qual as massas das estrelas podem ser obtidas; é difícil operar na prática e é surpreendente como foram realizados poucos cálculos precisos das massas estelares.

Em alguns binários, conhecidos como astrométricos, a presença de uma companheira invisível, demasiado fraca para ser vista em virtude do brilho da outra, pode ser deduzida do movimento oscilante da estrela mais brilhante à medida que se move através do espaço sob a influência de sua companheira mais fraca (Fig. 26). De acordo com a primeira lei de Newton, uma estrela isolada deveria se mover através do espaço em velocidade uniforme percorrendo uma linha reta (ignorando o campo gravitacional geral da galáxia); da mesma forma, o centro de massa de um sistema binário manterá uma velocidade constante através do espaço. Como pode ser visto na figura, as duas estrelas oscilarão em relação a esta linha.

Foi a partir destes estudos que a presença de uma companheira invisível de Sirius, a estrela mais brilhante do céu, foi deduzida pelo astrônomo alemão Friedrich Bessel (1784-1846). Embora Bessel tenha observado o movimento oscilante de Sirius em 1834, só em 1862 o astrônomo e fabricante de telescópios norte-americano Alvin Clark

Movimento do centro de massa

A

B

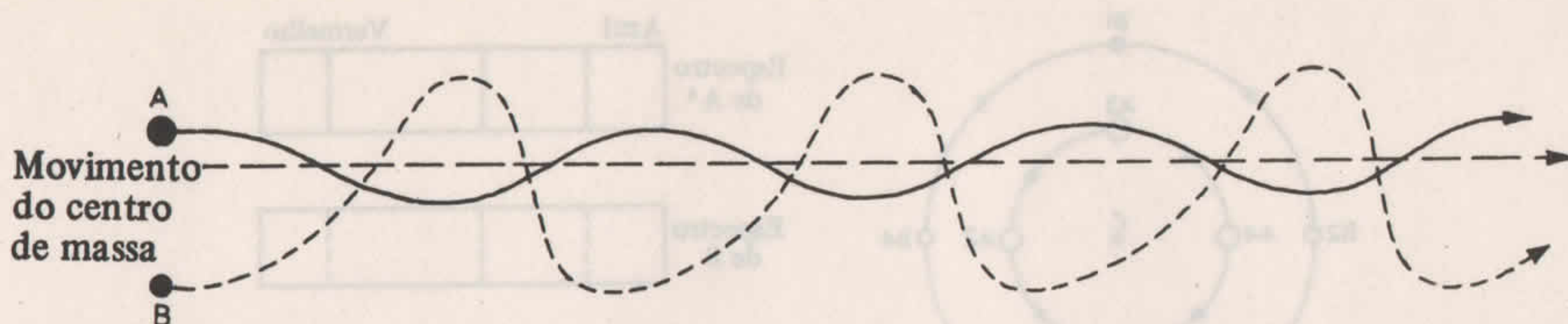



Fig. 26 Binário astrométrico. *As estrelas A e B constituem um binário, sendo A possuidora de maior massa e luminosidade do que B; esta última não pode ser vista diretamente da Terra. O centro de massa do sistema binário segue uma trajetória retilínea através do espaço embora, devido ao seu movimento orbital relativo, as estrelas A e B se movam de um lado para o outro desta linha. A será vista, portanto, percorrendo uma trajetôria ondulante, a qual implica na presença de uma companheira invisível.*

(1832-1897) conseguiu observar a companheira mais fraca, que veio a ser a primeira de uma classe de estrelas pequenas, densas e quentes conhecidas como anãs brancas.

Somente algumas estrelas próximas exibem um movimento aparente suficientemente grande no céu para que tais efeitos sejam prontamente detectados. Entretanto, apesar da dificuldade inerente para realizar estas observações, existem alguns casos nos quais a evidência sugere que as influências gravitacionais de *planetas* de grande massa sobre suas primas estrelas foram observadas. O melhor exemplo é a Estrela Barnard, uma estrela vermelha localizada a uma distância aproximada de 6 anos-luz que – de acordo com uma longa série de observações realizadas por Peter van Kamp, do Observatório Sproul – tem dois planetas compáráveis em massa a Júpiter (e pode ter, certamente, qualquer número de outros menores).

Na maior parte dos sistemas binários as estrelas estão demasiadamente juntas para serem vistas como objetos isolados e tudo que podemos observar através de um telescópio é uma "estrela" única constituída pela luz combinada dos dois componentes. Muito freqüentemente, em tal situação, o espectro da luz combinada revela a presença de duas estrelas porque, à medida que as estrelas revolvem em torno uma da outra (Fig. 27), em um momento particular uma das estrelas está se aproximando e a outra se afastando: de acordo com o efeito Doppler, as linhas espectrais da estrela que se aproxima desviam-se para o azul enquanto as da estrela que se afasta desviam-se para o vermelho. Assim

B1 A3 B2 A4 C A2 B4 A1 B3

Para a Terra

Azul Vermelho

Espectro de A

Espectro de B

1 2 3 4

Comprimento de onda crescente

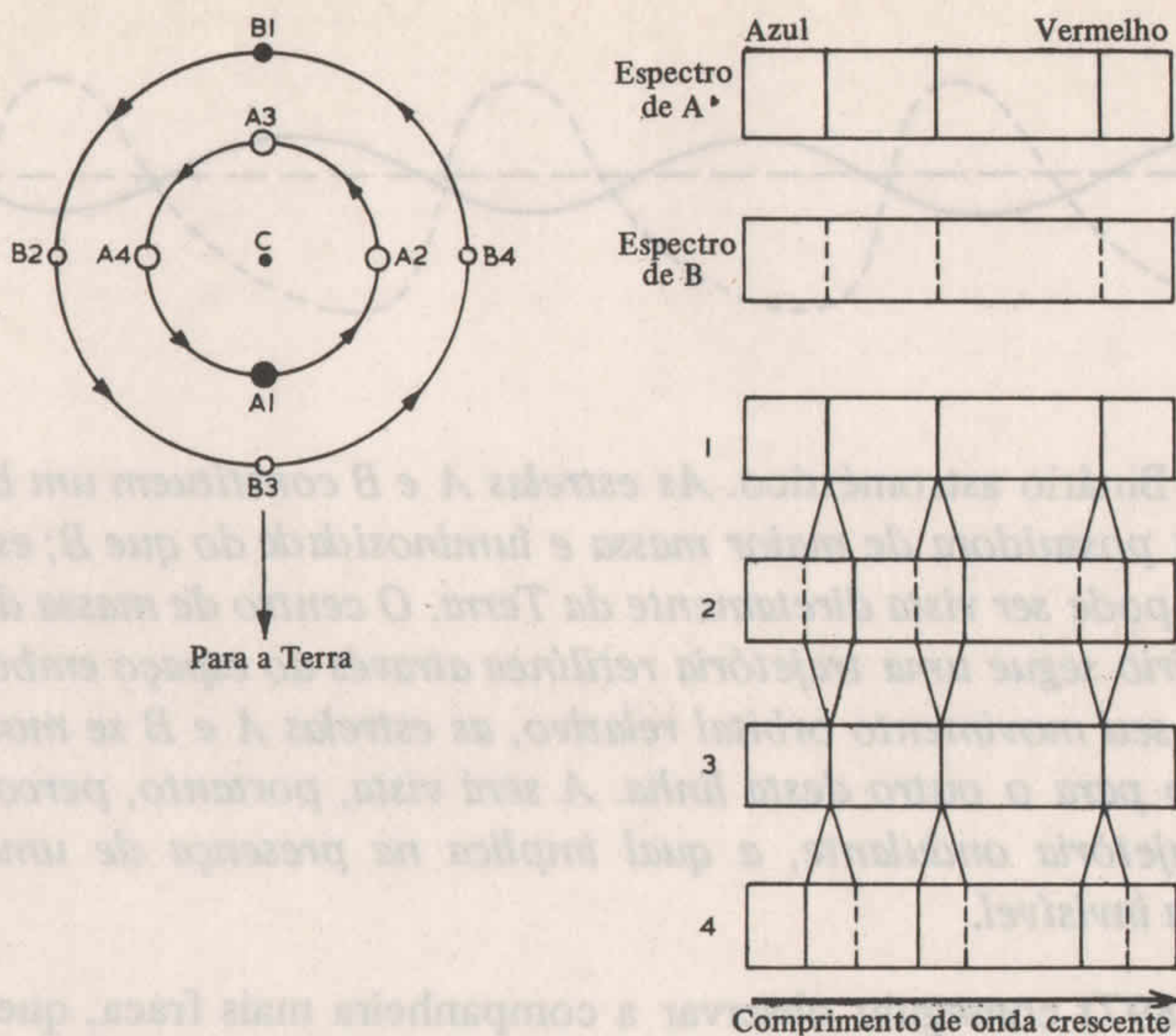
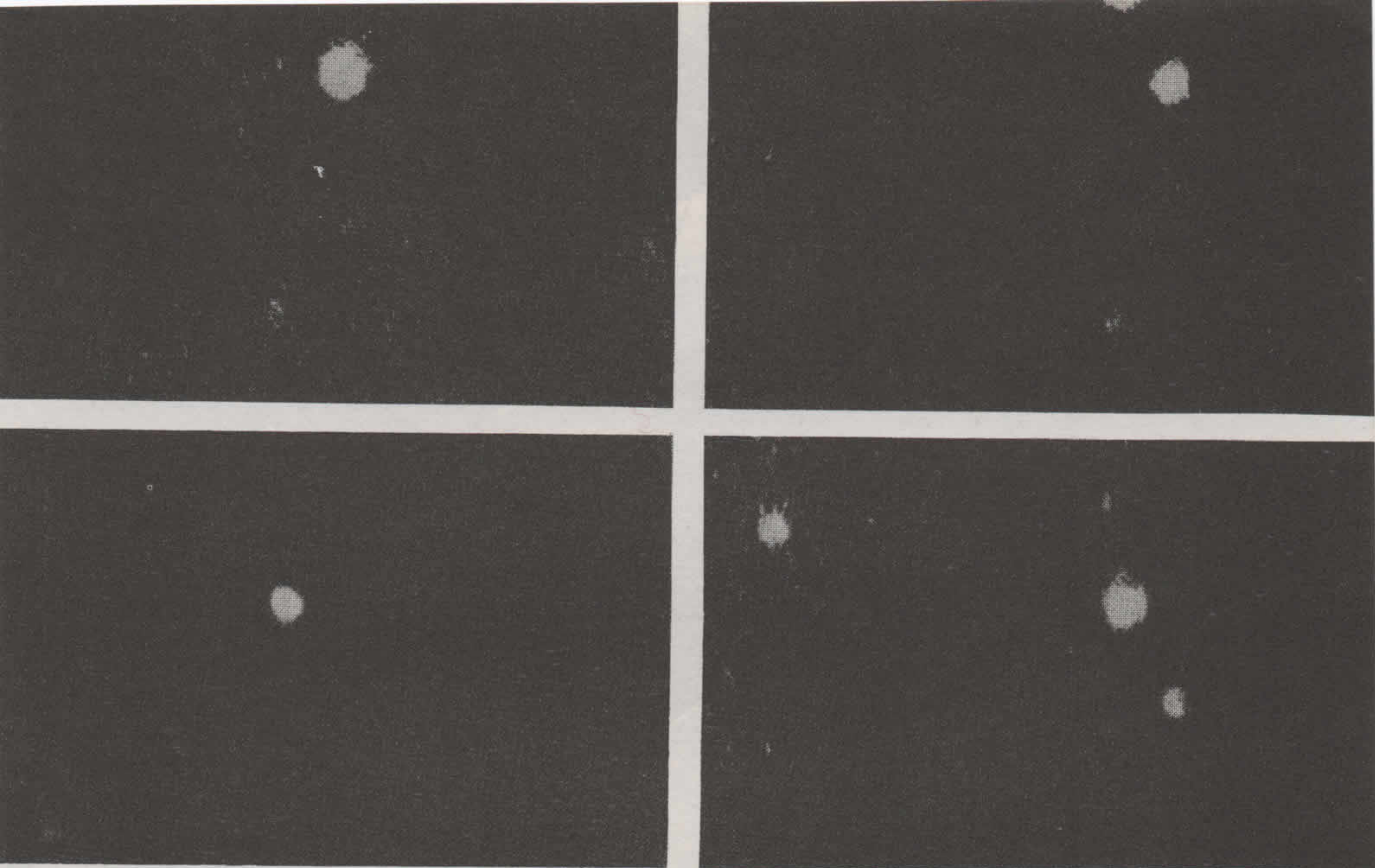
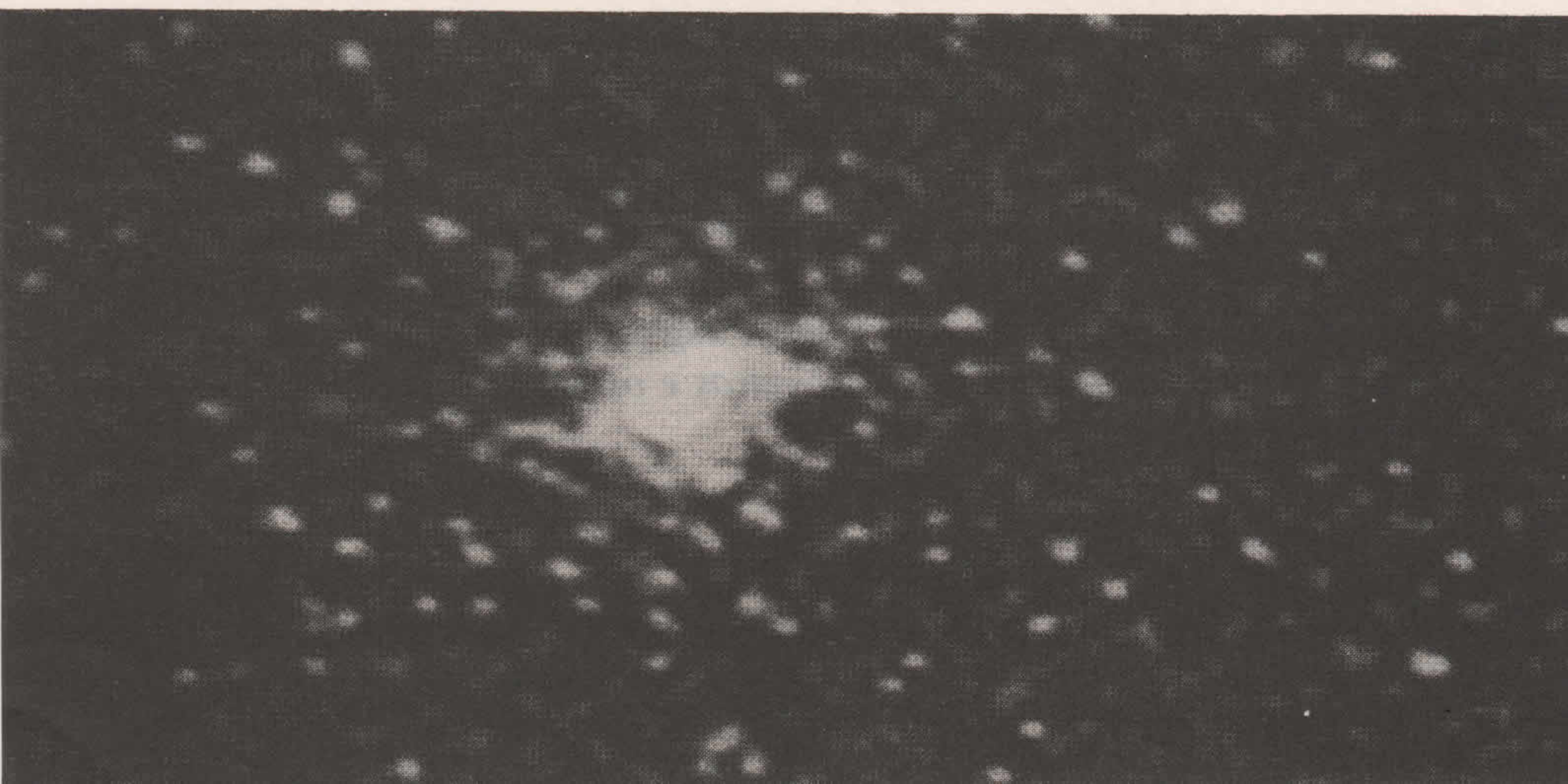
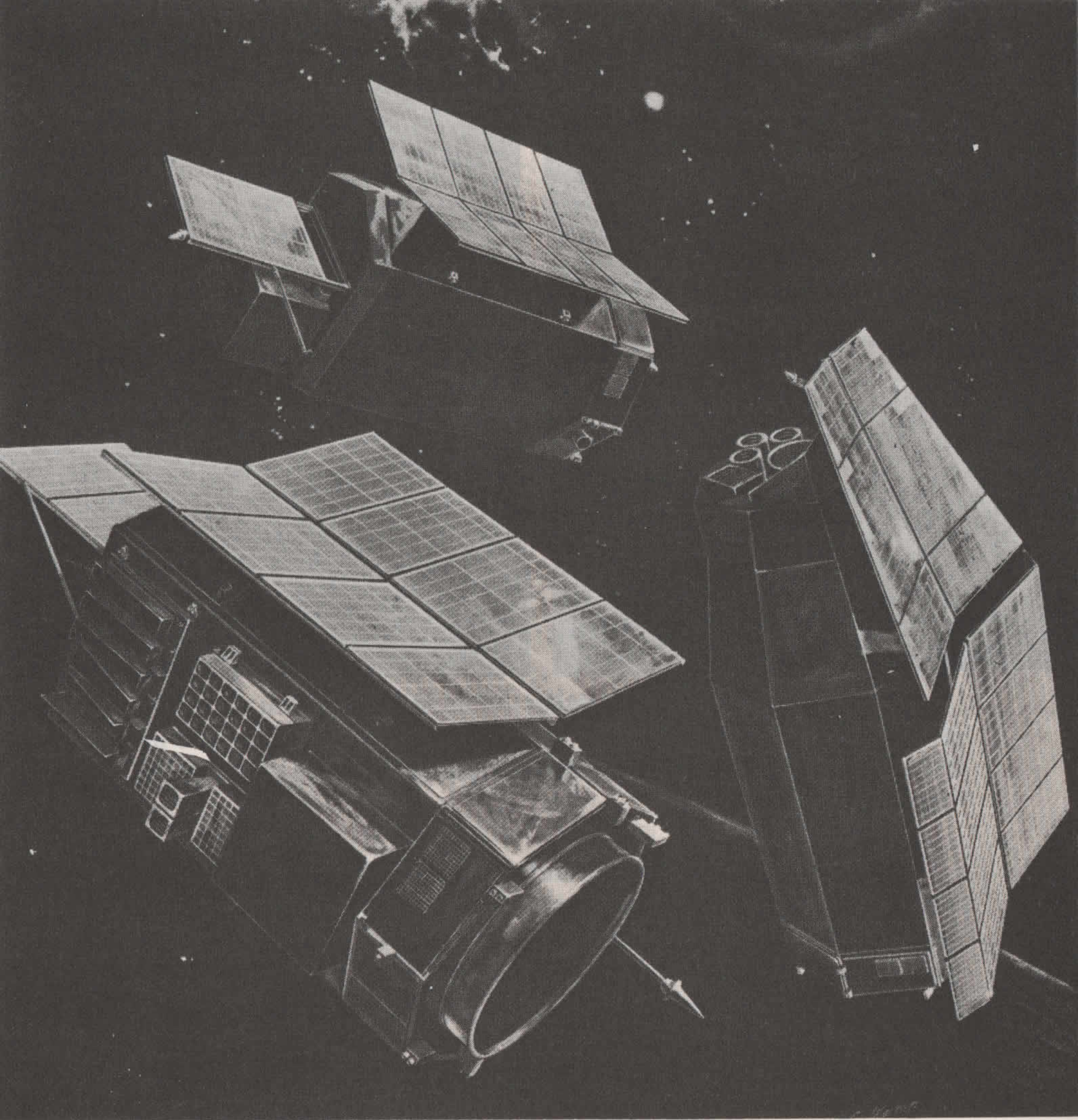



Fig. 27 Binário espectroscópico. *Duas estrelas, A e B, giram ao redor do seu centro de massa comum, C; suas órbitas são tais que as vemos aproximadamente "de topo". Cada estrela produz um espectro constituído de uma faixa multicolorida, sobreposta à qual acha-se um característico padrão de linhas escuras; para simplificar, as estrelas são apresentadas com idênticos espectros. Quando as estrelas estão na posição 1 cruzam nossa linha de visão e, naquele instante, nem se aproximam e nem se afastam da Terra. As linhas espectrais de ambas as estrelas não se acham desviadas nem para o vermelho nem para o azul e através do espectroscópio vemos apenas um conjunto de linhas espectrais (os dois conjuntos de linhas acham-se sobrepostos). Na posição 2, A está se afastando e B está se aproximando, donde resulta que as linhas espectrais de A estão desviadas para o vermelho e as linhas espectrais de B estão desviadas para o azul. Da mesma forma, os dois conjuntos de linhas espectrais estão separados pelo comprimento de onda e se apresentam separadamente quando observados através do espectroscópio. Na posição 3, as estrelas estão novamente atravessando a linha de visão enquanto, na posição 4, A está se aproximando e B está se afastando: os efeitos resultantes sobre o espectro observado são os que apresentamos. À medida que as estrelas revolvem em torno uma da outra o padrão das linhas espectrais muda de forma periódica, assim revelando a presença de duas estrelas.*

Quatro diferentes fases do pulsar NP 0532, na nebulosa do Caranguejo. O pulsar, que aumenta e diminui de brilho em um período de 0,033 segundos, é visto na condição de menor brilho na foto inferior esquerda.

Cisne X-1. Uma fotografia obtida com raios X pelo Observatório Einstein mostra a forte fonte de raios X associada a um sistema binário que contém a mais autêntica candidata para identificação como um buraco negro. O modelo mais popular sugere que os raios X são emitidos do material no disco de acreção que circunda um buraco negro entre 8 e 11 massas solares. Entretanto, as provas a favor desta sugestão não são conclusivas. (Cortesia de R. Giacconi, Divisão de Astrofísica de Alta Energia; Centro de Astrofísica Harvard/Smithsoniano.)

Os Observatórios Astronômicos de Alta Energia (HEAO I, à esquerda embaixo; HEAO 2, à direita embaixo; HEAO 3, no centro em cima) construídos pela NASA pelo Grupo de Sistemas e Defesas Espaciais TRW. O HEAO 1 e o HEAO 2 (conhecido como o "Observatório Einstein") foram lançados em 1977 e 1978 respectivamente para estudar os raios X de uma grande variedade de fotos, tais como aglomerações de galáxias, quasares, pulsares e buracos negros. O HEAO 3, lançado em 1979, está estudando os raios cósmicos e os raios gama. (Cortesia de TRW Inc.)

sendo, as linhas espectrais de cada estrela oscilarão em comprimento de onda de forma periódica, revelando a presença de duas estrelas.

Lobo de Roche A

Lobo de Roche B

L

A

B

(a)

L

(b)

L

(c)

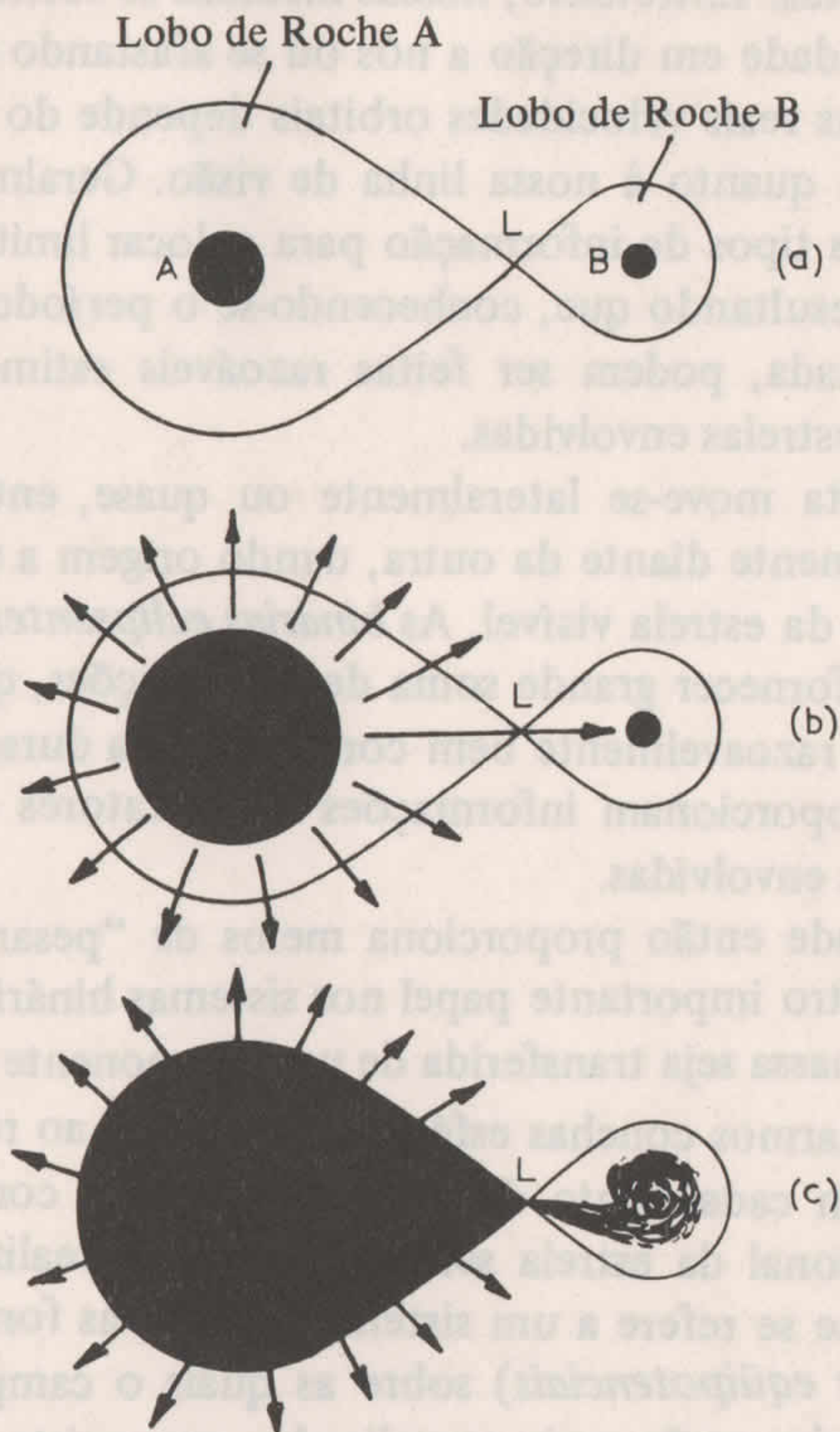



Fig. 28 Transferência de massa em um sistema binário. *A "figura em oito" é uma forma que denota a superfície equipotencial traçada ao redor do binário; uma partícula situada em qualquer ponto desta superfície sofre o mesmo valor do campo gravitacional (a estrela A tem mais massa do que a estrela B).* (a) *Ambas as estrelas se localizam bem dentro de seus lobos de Roche e conservam sua massa.* (b) *Se A se expande até quase preencher seu lobo, as partículas de A podem facilmente escapar sob a forma de um "vento" estelar; as partículas que passam através do ponto de interseção L (ponto interno de Lagrange) podem ser capturadas por B.* (c) *Se A preencher totalmente seu lobo de Roche pode ocorrer uma perda de massa bastante considerável: o material que cruza o lobo se perderá no espaço enquanto o material que passa através de L será acrescentado a B.*

Observações deste tipo nos permitem determinar o período do binário e obter algumas informações a respeito das velocidades das estrelas em suas órbitas. Entretanto, nossas medidas só fornecem a velocidade radial (velocidade em direção a nós ou se afastando de nós) e a relação desta com as reais velocidades orbitais depende do ângulo de inclinação da órbita quanto à nossa linha de visão. Geralmente é possível conseguir outros tipos de informação para colocar limites a este ângulo de inclinação, resultando que, conhecendo-se o período e a velocidade orbital aproximada, podem ser feitas razoáveis estimativas da massa combinada das estrelas envolvidas.

Se a órbita move-se lateralmente ou quase, então cada estrela passa alternadamente diante da outra, dando origem a uma variação de brilho aparente da estrela visível. As *binárias eclipsantes*, como são chamadas, podem fornecer grande soma de informações, quando o ângulo de inclinação é razoavelmente bem conhecido, e a duração e a natureza dos eclipses proporcionam informações sobre fatores como as dimensões das estrelas envolvidas.

A gravidade então proporciona meios de "pesar" as estrelas. E desempenha outro importante papel nos sistemas binários, uma vez que permite que a massa seja transferida de um componente para outro.

Se desenharmos conchas esféricas no espaço ao redor de uma estrela isolada, em cada ponto de uma determinada concha o valor do campo gravitacional da estrela será o mesmo. Se realizamos o mesmo exercício no que se refere a um sistema binário, as formas das superfícies (*superfícies eqüipotenciais*) sobre as quais o campo gravitacional tem o mesmo valor serão mais complicadas, mas existe uma "figura em oito" eqüipotencial que apresenta particular importância (Fig. 28). As duas seções da curva, cada uma contendo uma estrela, são conhecidas como *lobos de Roche*, em homenagem ao matemático francês E. Roche (1820-1883), que investigou efeitos gravitacionais periódicos como os das marés no século XIX.

A matéria contida em um lobo de Roche permanece sob a influência gravitacional da estrela daquele lobo que não pode escapar; a matéria que transpõe a figura em oito escapará para o espaço. Como veremos, nas últimas etapas de suas vidas muitas estrelas se expandem e, se uma estrela se expande além de seu próprio lobo de Roche, pode perder uma grande quantidade de seu material no espaço. Uma parte de sua matéria passará através do ponto de interseção do "8" (o ponto de Lagrange interno) para ser capturada pela estrela companheira. Desta

forma uma estrela em expansão pode "vazar" vastas quantidades de matéria para a sua companheira, cuja evolução, é desnecessário dizer, é seriamente afetada por isto. Pode ocorrer uma considerável perda de massa mesmo se uma estrela não transborde inteiramente seu lobo de Roche, uma vez que o material ejetado da estrela sob a forma de "vento estelar" pode escapar ou ser capturado pela companheira.

A transferência de massa nos sistemas binários tem a máxima importância em ampla variedade de situações astrofísicas.

Estrelas e seus ciclos vitais

MESMO QUANDO vista só através dos maiores telescópios ópticos as estrelas ainda aparecem como pontos de luz. No momento presente o Sol é a única estrela cuja superfície podemos examinar com detalhes; quanto às outras, os astrônomos tiveram de estabelecer seu conhecimento com base em um número limitado de observações de propriedades como brilho, cor, movimento e assim por diante. Como vimos, as massas das estrelas podem ser determinadas analisando o movimento de sistemas binários e ocorre que a maioria das estrelas possui uma massa que se localiza entre cerca de 0,1 e 10 massas solares, embora existam algumas estrelas com massas tão grandes quanto 50 ou mesmo 100 sóis. Outra importante quantidade é a *luminosidade*, a quantidade de energia radiante de todas as espécies emitida por uma estrela em cada segundo, isto é, o débito energético da estrela. A luminosidade do Sol, a qual freqüentemente usamos como uma unidade ao nos referirmos a outras estrelas, é cerca de 4×10^{26} watts. As luminosidades das estrelas variam de menos de dez milésimos até mais de 100.000 luminosidades solares.

A cor de uma estrela dá uma indicação de sua temperatura, sendo as estrelas vermelhas relativamente frias, com temperaturas superficiais em torno de 3.000° K, sendo as estrelas amarelas como o Sol mais quentes (cerca de 6.000° K) e as estrelas azuis muito mais quentes ainda (20.000 – 30.000° K). Informações muito mais pormenorizadas a respeito de uma estrela podem ser obtidas analisando seu espectro. O interior quente e denso de uma estrela emite um espectro contínuo, uma faixa multicor de todos os comprimentos de onda, enquanto na atmosfera estelar mais rarefeita os átomos absorvem a luz de determinados comprimentos de onda (veja Capítulo 4), dando origem a característicos padrões de absorção que vão produzir linhas escuras con-

tra fundo brilhante do espectro contínuo. As linhas que estão presentes e o aspecto destas linhas (por exemplo, finas, grossa, tênues, acentuadas) dependem de vários fatores relativos à estrela – temperatura, composição química, densidade, velocidade de rotação, intensidade do campo magnético e assim por diante – e a análise dos espectros proporciona uma grande proporção do nosso conhecimento da natureza física das estrelas.

Se as estrelas forem dispostas de acordo com suas luminosidades e suas temperaturas em um diagrama (Fig. 29), conhecido como o dia-

SUPERGIGANTES
GIGANTES VERMELHAS
Sol
SEQUÊNCIA PRINCIPAL
ANÃS BRANCAS
Luminosidade (Sol = 1)
10000
100
1
1/100
1/10000
30000 20000 10000 6000 3000
Temperatura (K)

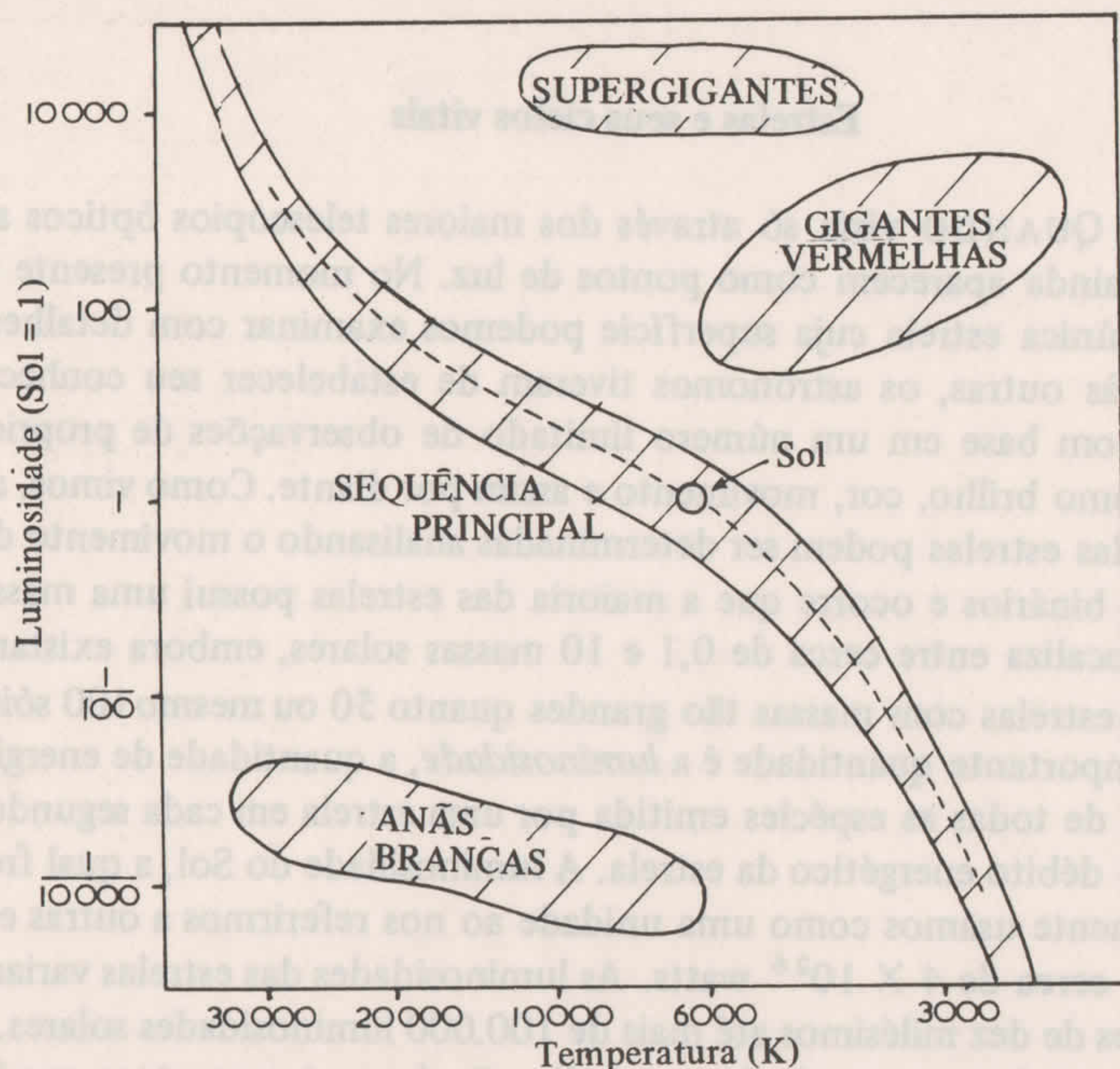



Fig. 29 Diagrama de Hertzsprung-Russell. *As estrelas recebem posições no diagrama de acordo com a sua luminosidade e sua temperatura. O Sol, por exemplo, recebe a luminosidade igual a 1 e tem em sua superfície uma temperatura pouco abaixo de 6.000*^{o}*K. As gigantes vermelhas são estrelas frias porém altamente luminosas; as anãs brancas são quentes mas com muito baixa luminosidade. Uma estrela típica, durante a duração de sua vida, passa pela seqüência principal e ali despende a maior parte do tempo; tornar-se-á, sucessivamente, uma gigante vermelha e uma anã branca. Algumas estrelas têm destinos muito diferentes, como foi discutido no texto.*

grama de Hertzsprung-Russell em homenagem aos dois astrônomos que no início do século XX observaram independentemente o relacionamento, verifica-se que a maior parte das estrelas situa-se em uma faixa denominada a seqüência principal, que vai do alto à esquerda (estrelas brilhantes e quentes) até embaixo à direita (estrelas tênues e frias). Isto nos diz que, como uma regra geral, quanto mais quente a estrela, mais luminosa ela é, um fato que não parece particularmente surpreendente.

Entretanto, existem estrelas que não preenchem este padrão. Em particular, na porção superior direita do diagrama existem algumas estrelas laranjas e vermelhas, frias, que são altamente luminosas. Como as estrelas de mesma temperatura emitem aproximadamente a mesma quantidade de luz de cada metro quadrado de sua superfície, as intensas luminosidades dessas estrelas implicam que elas devem ser muito maiores do que as estrelas da seqüência principal de mesma temperatura. Conseqüentemente, essas estrelas são conhecidas como *gigantes vermelhas* e *supergigantes*. A importante estrela Betelgeuse, na constelação de Orion, é uma gigante vermelha tão grande que se fosse colocada onde está o Sol, a órbita do planeta Marte estaria facilmente contida dentro dela.

Um número significativo de estrelas que possuem altas temperaturas superficiais apresenta, não obstante, baixa luminosidade. Aplicando a mesma espécie de argumento como fizemos acima, concluímos que estas estrelas devem ser muito pequenas – donde o nome *anãs brancas*. Uma típica anã branca teria aproximadamente o tamanho da Terra.

Estrelas como o Sol vivem bilhões de anos e é claramente impossível para os astrônomos acompanhar uma estrela isolada através de seu ciclo vital, desde o nascimento até a morte. Em vez disso, observando um número suficientemente grande de estrelas, podemos ver estrelas de todos os tipos, em diferentes etapas de seus ciclos vitais e examinando estas etapas diferentes podemos reunir os diferentes passos revolucionários através dos quais uma estrela isolada passa durante o seu tempo de vida.

As estrelas nascem dentro de nuvens de gás. Podemos ver algumas dessas nuvens diretamente, aquelas que emitem luz devido à presença, dentro delas, de jovens estrelas intensamente luminosas, são conhecidas como *nebulosas de emissão*. Se uma localizada região de tal nuvem excede certa massa, a atração gravitacional brota de todos os átomos naquela região e faz com que ela comece a se retrair. À medida que isso

ocorre, sua temperatura aumenta. Enquanto a nuvem era grande e distendida possuía uma grande soma de energia potencial – tal como um peso suspenso acima da superfície da Terra possui certa quantidade de energia potencial, igual a sua massa multiplicada pela sua altura e pela aceleração devida à gravidade. À medida que as partículas na nuvem se reúnem esta energia potencial se converte em energia cinética ou energia do movimento – tal como, quando largamos o peso suspenso, ele cai com velocidade cada vez maior até atingir o solo. Parte da energia das partículas contribui para elevar a temperatura da nuvem, enquanto o restante se perde no espaço sob a forma de radiação. A nuvem em colapso se torna uma *proto-estrela*.

De fato, existem muitos problemas associados a nossas idéias a respeito da formação das estrelas. Em virtude da temperatura e da pressão internas das nuvens interestelares típicas, é difícil perceber como uma massa de menos de cerca de 10.000 massas solares (várias centenas de milhares de massas solares se levarmos em consideração os campos magnéticos) podem entrar em colapso sob seu próprio peso a menos que influenciadas por alguma espécie de "gatilho" O gatilho pode ser o encontro da nuvem com uma região mais densa – por exemplo, a nuvem pode chocar-se com um dos braços da espiral da nossa galáxia – ou talvez a "onda de choque" da explosão de uma supernova. Existem boas razões para supor que o colapso de uma grande nuvem resultará em sua fragmentação em um grande número de pequenas nuvens que irão formar estrelas separadas. Qualquer que seja o mecanismo envolvido, sabemos que as jovens estrelas são encontradas em nuvens.

À medida que a temperatura e a densidade da proto-estrela aumentam, a velocidade de contração diminui. Eventualmente a temperatura e a densidade no núcleo se tornam suficientemente grandes para iniciar reações termonucleares, fundindo núcleos de hidrogênio para formar núcleos de hélio. Neste processo, cerca de 0,7 por cento da matéria envolvida é destruído, sendo convertido em energia de acordo com a fórmula de Einstein, $E = mc^2$: no Sol, por exemplo, cerca de 4 milhões de toneladas de matéria são convertidos em energia por segundo. Quando este processo se estabelece, é atingido um estádio de equilíbrio no qual a pressão para fora do gás quente no interior da estrela contrabalança a auto-atração gravitacional que está comprimindo a estrela. Ela se torna uma estrela estável da seqüência principal com uma temperatura e luminosidade determinadas pela massa da estrela – quanto maior esta massa, mais luminosa ela é.

Uma estrela permanece na seqüência principal durante a maior parte de sua vida. Quanto mais massa possui, mais curta é sua fase na seqüência principal: o Sol, por exemplo, tem uma vida na seqüência principal entre 10 e 11 bilhões de anos (ele tem agora cerca de 5 bilhões de anos de idade) mas uma estrela, digamos, com 10 massas solares, embora tenha 10 vezes mais combustível, é milhares de vezes mais luminosa e assim consome suas reservas muito mais depressa.

Eventualmente a usina de força no núcleo central da estrela esgota o hidrogênio que lhe serve como combustível e encolhe sob o peso do resto da estrela. Quando isto ocorre, a temperatura sobe na camada circundante de hidrogênio até uma extensão suficiente para permitir a reação de fusão do hidrogênio para o hélio, o que vai ocorrer progressivamente a partir do núcleo original. O resultado prático é um aumento da luminosidade da estrela e ela se expande até que a pressão de dentro para fora e a força gravitacional de fora para dentro estejam uma vez mais em equilíbrio. Nesse momento uma nova reação de fusão, convertendo hélio em carbono, começou no núcleo e a estrela atinge outro estado estável – torna-se uma gigante vermelha.

Uma estrela não permanece uma gigante vermelha durante muito tempo, porque está consumindo suas reservas de energia rapidamente. Quando todos os combustíveis nucleares possíveis foram utilizados (nas estrelas de grande massa estas reações podem continuar até que o ferro seja produzido no núcleo) a estrela não pode mais manter-se e a gravidade ganha a próxima parada.

As estrelas com uma massa final menor do que cerca de 1,25 massas solares são comprimidas pela gravidade até que atinjam velocidades em torno de $10^8 - 10^9$ kg por metro cúbico. Tornam-se anãs brancas, estrelas que durante éons de tempo esfriam eventualmente até se tornarem anãs negras. O material contido em uma típica anã branca está tão densamente comprimido que uma colher de chá do mesmo, trazido à Terra, pesaria várias toneladas.

Uma estrela que está no final de sua vida e possui uma massa acima deste limite não pode ser uma anã branca. Ao invés disso, ela se torna uma *estrela-nêutron*, uma estrela tão seriamente afetada que seus prótons e elétrons foram forçados a combinar-se para formar nêutrons eletricamente neutros. Uma típica estrela nêutron teria um raio de apenas cerca de 10 km e a densidade de seu material seria da ordem de 10^{18} kg por metro cúbico, isto é, sobre a Terra, uma colher de chá da mesma pesaria vários bilhões de toneladas!

Admite-se que muitas – se não todas – as estrelas-nêutrons são formadas da seguinte maneira. Quando os núcleos de estrelas com muitas vezes a massa do Sol não são mais capazes de manter-se contra a gravidade, entram em colapso, com as camadas exteriores da estrela no topo, a tremenda quantidade de energia liberada resulta em uma explosão de supernova, a qual lança a maior parte exterior da estrela no espaço. O exemplo mais bem conhecido deste fato foi a "estrela visitante" vista por observadores chineses no ano 1054, uma estrela que brilhava a olho nu, tornando-se brilhante a ponto de ser vista à luz do dia, antes de apagar-se após alguns meses. Ainda podemos ver o que é denominado a nebulosa do Caranguejo, nos turbulentos remanescentes daquela estrela que explodiu.

É no coração da nebulosa do Caranguejo que se acha uma estranha fonte pulsante de radioondas, luz e raios X, emitindo pulso de radiação cerca de 30 vezes por segundo. É conhecida como um pulsar. Bem mais de três centenas de pulsares são conhecidos (suficientes, parece, para coincidir com o número esperado de supernovas na galáxia); o primeiro foi descoberto por Jocelyn Bell (hoje Jocelyn Burnell) e Antony Hewish durante uma pesquisa realizada em Cambridge em 1967. Admite-se em geral que um pulsar é uma estrela nêutron em rápida rotação a partir da qual a radiação é emitida sob a forma de feixes estreitos (Fig. 30). De cada vez que a estrela nêutron gira em nossa direção captamos um impulso – da mesma maneira que podemos ver pulsos de luz de uma lâmpada doméstica.

Como foi assinalado pela primeira vez em 1939 por J. R. Oppenheimer e H. Snyder, da Universidade da Califórnia, existe uma massa máxima possível que uma estrela-nêutron de rotação moderada pode ter. Embora o valor deste limite máximo ainda não tenha sido bem estabelecido, acredita-se que não seja mais do que duas ou três massas solares. Existem muitos meios através dos quais as estrelas podem perder massa perto do fim de suas vidas – vento estelar, transferência de massa em sistemas binários, supernovas e assim por diante – mas existem significativos números de estrelas 10, 20 ou mesmo 50 vezes a massa do Sol que parece altamente improvável que todas estas perderão suficiente massa para chegar abaixo do limite. A teoria sugere que uma estrela ou um núcleo estelar que exceda este limite comece a entrar em colapso sobre sua própria atração gravitacional, nada pode deter o colapso. A matéria que constitui a estrela entra em colapso sem limite até que, em princípio, é toda comprimida em um ponto. À medida que o

Fixo de rotação

Para a Terra

Feixe emitido

Eixo magnético

(a)

Intensidade do sinal

P

Tempo

(b)

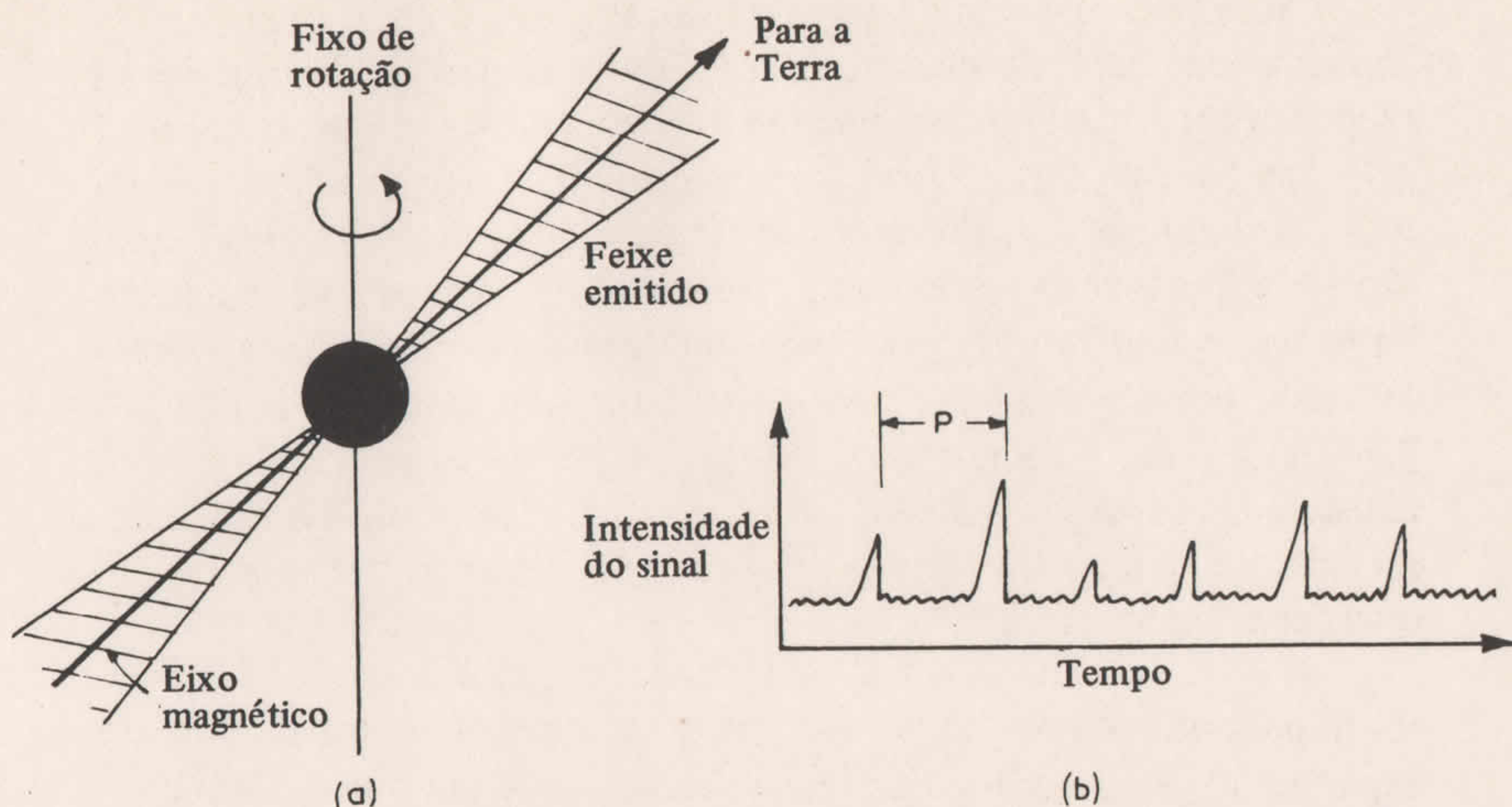



Fig. 30 Um pulsar. *Acredita-se que um pulsar consista de uma estrela nêutron de rápida rotação (*a*) que emite radiação em duas direções opostas, sob a forma de feixes estreitos. Quando o feixe se acha dirigido para a Terra, recebemos um pulso de sinal, como um clarão, sendo o padrão de sinais resultantes apresentado em (*b*). No intervalo entre os pulsos, o período, P, é notavelmente constante e, no que se refere aos pulsares conhecidos, apresenta valores entre cerca de 0,03 segundos e alguns segundos. Com o passar dos séculos, P diminui lentamente, donde resulta que sua medida pode fornecer alguma indicação sobre a idade relativa de um pulsar. Deve-se frisar que existem vários modelos teŕoicos de como e de onde a emissão do pulsar é liberada. Esta ilustração mostra um modelo, onde as emissões provêm da região dos pólos magnéticos; em outra, a emissão provém de uma área acima do equador.*

colapso progride, a força de gravidade na superfície sobe até atingir uma etapa em que nem mesmo a luz pode escapar. A estrela desaparece, formando o que veio a ser conhecido como um buraco negro.

Os buracos negros representam regiões no espaço de extremos campos gravitacionais – regiões que exigem, para a sua abordagem, todo o arsenal da Relatividade Geral. É a possibilidade de detectar estas curiosas entidades que, mais do que qualquer outra coisa, desencadeou o grande surto de interesse na física gravitacional que vemos hoje.

7
Extremos da gravidade

PARA O TEÓRICO, os buracos negros são excitantes porque representam uma fronteira na qual as teorias convencionais da gravitação são estendidas até seu limite, onde novos refinamentos ou teorias revolucionárias se tornam necessários. Para o astrofísico, apresentam o máximo interesse porque podem fornecer informações para alguns dos fenômenos mais espantosos do Universo. Para a maior parte de nós possuem uma aliciante fascinação em virtude dos estranhos efeitos sobre o espaço-tempo com os quais eles estão associados. Para o escritor de ficção científica, representa um misto de bênção e maldição: por um lado abrem fascinantes possibilidades, mas pelo outro representam uma área na qual a verdade é mais estranha do que a ficção e onde os escritores de ficção podem ser superados pelas previsões bizarras de cientistas sóbrios trabalhando com leis da Natureza bem estabelecidas.

O que é um buraco negro? Essencialmente, trata-se de uma região do espaço dentro da qual a matéria caiu e da qual nada pode escapar; dentro de um buraco negro a gravidade é tão poderosa que nem mesmo a luz pode se mover para fora. O termo "negro" é altamente apropriado, pois se nem a luz pode emergir de dentro de um buraco negro, ele deve ser uma entidade inteiramente negra; o termo "buraco" também é adequado, uma vez que ilimitadas quantidades de matéria ou energia podem cair nele e neste sentido é como um abismo sem fundo. Como veremos nos capítulos posteriores, os buracos negros não são tão simples como parecem, mas o conceito básico permanece o mesmo.

O termo "buraco negro" foi cunhado em 1968 pelo professor J. A. Wheeler, da Universidade Princeton, mas a idéia de que tais entidades pudessem existir é muito mais antiga. Em certo sentido, a idéia é de duzentos anos atrás. Em um comunicado lido perante a Sociedade Real de Londres em 1783 e publicado em suas *Philosophical Transactions* no ano seguinte, o físico inglês John Michell (1724-1793) aludiu à possibilidade de que, como Newton propusera, a luz consistia de um feixe de partículas; então estas partículas deveriam ser afetadas pela gravidade da mesma maneira que os corpos materiais. Por isso, sugeria ele, a luz que se mova para longe de um corpo de grande massa deveria ser retardada. Em particular, assinalou ele, a luz poderia não conseguir escapar de um corpo com a mesma densidade do Sol mas um raio 500 vezes maior, uma vez que a velocidade de escape* ao nível da superfície de tal corpo seria maior do que a velocidade da luz.

Cerca de 13 anos mais tarde, o grande matemático francês Pierre Simon Laplace (1749-1827) fez observações similares em seu livro *Exposition du Système du Monde*, sugerindo que um corpo com 250 vezes o raio do Sol e a mesma densidade da Terra seria invisível porque sua luz não poderia escapar. Levando em conta que a densidade da Terra é cerca de quatro vezes maior do que a densidade do Sol, as sugestões feitas por Laplace e por Michell concordam inteiramente uma com a outra.

Trata-se de um raciocínio singelo aplicar este conceito a qualquer corpo de massa M para achar o raio dentro do qual ele teria de ser comprimido a fim de que sua velocidade de escape seja maior do que a velocidade da luz. Se colocarmos a velocidade de escape (v_e) igual à velocidade da luz (c) podemos escrever a fórmula $c = \sqrt{2GM/R}$. Manipulando esta fórmula, verificamos que um corpo de massa M tem uma velocida-

* A velocidade de escape à superfície de um corpo é a velocidade mínima que um projétil precisa para ser disparado para cima de tal forma que continue a se afastar sem cair de novo. Quando um objeto é disparado com uma determinada velocidade, atinge uma altura particular antes de cair de volta ao solo. Se for disparado em maior velocidade atingirá maior altura antes de cair, e se for lançado precisamente com velocidade de escape sofrerá uma desaceleração à medida que se afasta mas sua velocidade não cairá até zero até atingir uma distância infinita. Se um corpo é projetado a uma velocidade maior do que a velocidade de escape, então sua velocidade jamais cairá até zero. A velocidade de escape (v_e) é facilmente calculada pela fórmula $v_e = \sqrt{2GM/R^2}$, onde G é a constante gravitacional, M a massa do corpo do qual se deseja escapar e R é a distância a partir do centro daquele corpo. A velocidade de escape na superfície da Terra é de 11,2 km por segundo.

de de escape maior do que a velocidade da luz quando comprimido dentro de um raio R onde R é igual a $2GM/c^2$.

A possibilidade de que possam existir objetos do tipo indicado por Michell e Laplace despertou pouco interesse na época e foi deixada de lado por mais de um século. Entretanto, em 1916, poucos meses após a publicação da Teoria Geral da Relatividade de Einstein, o teórico alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) resolveu as equações de campo descrevendo o espaço-tempo na vizinhança de uma porção esférica de matéria. Sua solução pode ser interpretada da seguinte maneira: se uma massa M é comprimida dentro de um certo raio (que chamaremos R, para indicar o raio de Schwarzschild), o espaço-tempo é distorcido de forma tão intensa que a luz não pode escapar. Como nada pode viajar mais depressa que a luz, nenhum objeto material ou sinal de qualquer espécie pode escapar de dentro desse raio. Um raio de luz emitido radialmente para fora em R_1 teria de permanecer ali, flutuando, pelo resto do tempo; com efeito, estaria se dirigindo para fora até o momento em que se detivesse. A região do espaço para fora da qual nada pode escapar é o que nós chamamos hoje um buraco negro.

A partir da solução de Schwarzschild, vemos que, para qualquer corpo de massa M, $R_s = 2GM/c^2$. O que há de notável a respeito desta fórmula é que é precisamente a mesma derivada da teoria de Newton da gravitação e da idéia da velocidade de escape. Naturalmente, não devemos nos surpreender de que a Relatividade Geral e a teoria newtoniana freqüentemente dêem os mesmos resultados, porque somente em circunstâncias extremas esperamos que as diferenças entre as duas teorias sejam manifestas. Não obstante, um buraco negro dificilmente constitui algo que possamos chamar de "circunstâncias normais" e é bastante surpreendente verificar que ambas as teorias aparentemente dêem as mesmas respostas neste contexto.

De fato, o "buraco negro" da teoria newtoniana não é realmente o mesmo tipo de coisa derivada da Relatividade Geral. Embora dê uma boa explicação para o que está acontecendo, a velocidade de escape é um argumento falho sob um aspecto. Nem você nem eu podemos certamente atirar uma bola mais depressa do que a velocidade de escape da Terra, mas podemos atirá-la para o ar; quanto mais depressa nós a arremessarmos, mais alto ela sobe antes de cair. Da mesma forma, com base na teoria newtoniana, as partículas de luz devem ser capazes de viajar a uma certa distância afastando-se de um buraco negro antes de cair de novo, mesmo se a velocidade de escape ao nível da superfície fosse con-

sideravelmente maior do que a velocidade da luz. Em um buraco negro de Schwarzschild, por outro lado, a luz emitida ao nível da "superfície" – isto é, ao nível do raio de Schwarzschild – não pode se mover para fora de forma alguma. A concordância entre a teoria newtoniana e a teoria einsteiniana é bastante superficial.

O buraco negro de Schwarzschild

UM BURACO negro se forma quando uma determinada quantidade de matéria é comprimida dentro de seu raio de Schwarzschild. Como vimos no Capítulo 6, um modo pelo qual isto pode acontecer é quando uma estrela de grande massa, no final de sua vida, entra em colapso sob sua própria atração gravitacional. Se, quando começa o colapso, a massa final da estrela, seu núcleo ou remanescente, excede três massas solares (o limite pode ser menor do que este), então, até onde sabemos até o momento não existe qualquer força na natureza que possa deter o indefinido colapso desta estrela: o colapso continuará até que todo o material estelar seja comprimido em um ponto conhecido como uma *singularidade*. Na singularidade, a matéria é infinitamente comprimida a uma infinita densidade por forças gravitacionais infinitamente poderosas; em outras palavras, a curvatura do espaço-tempo é infinitamente grande ao nível da singularidade. Forças e densidades infinitas não são fenômenos que a física nos dias de hoje possa manipular: as leis da natureza tais como as conhecemos se desintegram ao nível de uma singularidade. A matéria que constituiu a estrela parece ser aniquilada na singularidade.

Tem-se afirmado que talvez alguma nova força possa evitar o colapso antes de atingir a densidade finita. Nos dias de hoje isto é assunto de pura especulação. A gravidade é uma força tão fraca, comparada com as outras forças da Natureza, que os efeitos quânticos – que facilmente podemos observar diante das outras forças – não se tornam dominantes com a gravidade, pelo que se admite hoje, até que se esteja diante de distâncias muito pequenas, possivelmente tão pequenas quanto o comprimento de Planck, 10^{-35} metros. Contudo, não temos ainda uma teoria quântica da gravidade. Talvez quando dispusermos de uma teoria deste gênero verifiquemos que verdadeiras singularidades não ocorrem na natureza, mas com os dados presentes parece que a Relatividade Geral funcionará bem dentro de um buraco negro até pelo menos à vizinhança imediata da singularidade e que a matéria *será* com-

primida dentro de um volume microscópico no centro de um buraco negro.

À medida que a estrela em colapso atravessa seu raio de Schwarzschild, desaparece de nossa vista porque a luz da sua superfície não é mais capaz de nos atingir. Dizemos que se formou um horizonte: não podemos ver o que está acontecendo além deste horizonte. Temos muitas razões para supor que a estrela continua o processo de colapso até atingir uma singularidade, mas não há nenhum meio pelo qual possamos ver como isto acontece e nem como possamos obter informações a respeito do destino do material que constituía a estrela. O buraco negro resultante do colapso da estrela (Fig. 31) é o volume esférico de espaço cujo centro é a singularidade e cujo raio é igual ao raio de Schwarzschild. O limite do buraco negro é conhecido como o horizonte dos eventos porque nenhum conhecimento de quaisquer eventos que tenha lugar além daquele horizonte pode ser comunicado ao Universo exterior.

Quadro 2 Exemplos de raios de Schwarzschild

Objeto	Massa	Raio de Schwarzschild (R_s)*	Densidade da massa em colapso ao atingir seu raio de Schwarzschild kg/m^3)*
Pequena montanha	10^{12}kg	10^{-15}m	10^{56}
Pequeno asteróide	10^{18}kg	10^{-9}m	10^{44}
Terra	6 x 10^{24}kg	1cm	10^{30}
Sol	2 x 10^{30}kg = $1M_\odot$†	3km	10^{19}
Estrela de grande massa	$10M_\odot$	30km	10^{12}
Possível massa colapsada em núcleo galáctico ativo	$10^8 M_\odot$	3 x 10^8km	10^3 (dentisdade da água)
Galáxia inteira	$10^{11} M_\odot$	0.03 anos-luz	10^{-3}

* Os valores de R_s e a densidade são aproximados, achando-se arredondados para a mais próxima potência de 10 no último caso.

†$1M_\odot$ é a massa do nosso Sol.

Um buraco negro, evidentemente, não possui qualquer superfície sólida. Se pudéssemos cruzar o horizonte dos eventos não nos daríamos conta de que o espaço fosse diferente do espaço em qualquer outro lugar, mas uma vez dentro deste limite nos sentiríamos incapazes de nos movermos para fora e cairíamos inexoravelmente dentro da singularidade central. O horizonte dos eventos é um limite com uma só direção. Os objetos materiais, luz ou qualquer outra espécie de radiação, podem cair em um buraco negro, mas nada pode sair dele.*

Em princípio, se não na prática, quase qualquer quantidade de material pode transformar-se em um buraco negro. Para cada massa existe um raio de Schwarzschild dentro do qual ela pode ser comprimida (são fornecidos exemplos na Tabela 2). Para dar uma idéia da escala, o raio de Schwarzschild no que se refere ao Sol é pouco menor do que 3 km e assim seria necessário comprimir o Sol dentro desse raio para convertê-lo em um buraco negro. Como o raio atual do Sol é cerca de 700.000 km, sua densidade média ao atingir seu raio de Schwarzschild teria mais de 10 milhões de bilhões (10^{16}) maior que a densidade da

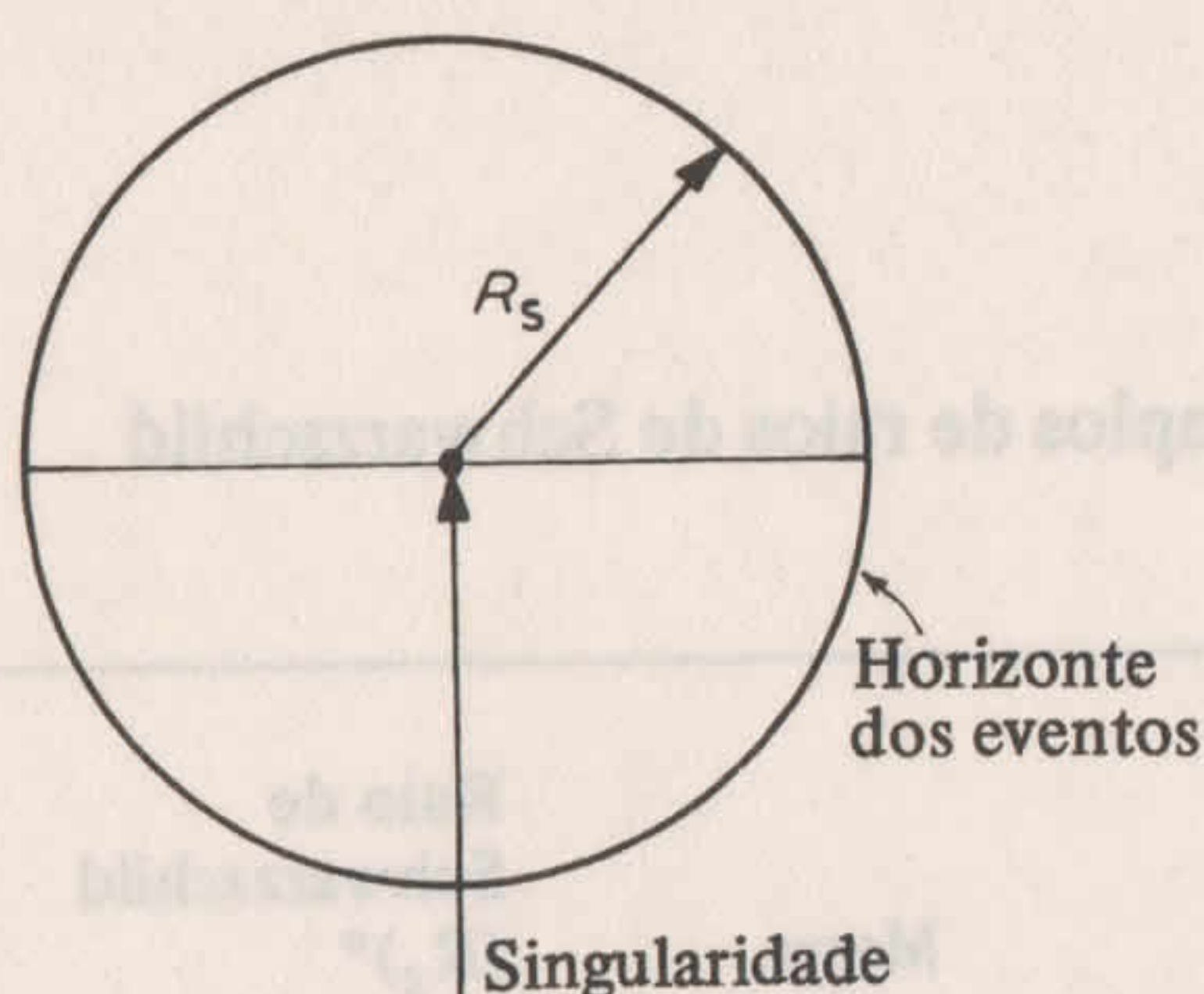



Fig. 31 Um buraco negro de Schwarzschild. *Um buraco negro simples e desprovido de rotação é uma região esférica cujo raio é igual ao raio de Schwarzschild* (R_S) *correspondente à massa do buraco. O limite do buraco é chamado horizonte dos eventos; nenhum sinal, raio de luz ou corpo material pode escapar deste limite. No centro, a matéria é esmagada por forças gravitacionais infinitas, isto é, existe uma singularidade central.*

* Nos próximos capítulos veremos que a situação não é tão simples quanto parece.

água. Se, em um acesso de megalomania um cientista louco desejasse converter a Terra em um buraco negro, o planeta teria de ser comprimido dentro de um raio de menos de 1 *centímetro*!

Não existe nenhuma forma natural pela qual o Sol possa ser transformado em um buraco negro no presente estado do Universo. Como vimos, as estrelas que terminam suas vidas com massas menores do que duas ou três massas solares provavelmente acabarão como anãs brancas ou estrelas-nêutrons. Entretanto, existem muitas estrelas que se acham bem acima deste limite e, embora existam muitas maneiras pelas quais elas possam expelir o excesso de massa no fim de suas vidas, não obstante é altamente provável que uma destas estrelas de grande massa *entre* em colapso para formar buracos negros.

Uma estrela com 10 massas solares tem um raio de Schwarzschild de aproximadamente 30 km. Uma vez que o volume de uma esfera depende do cubo de seu raio e o raio de um buraco negro depende de sua massa, a densidade da matéria no instante em que a estrela atinge o seu próprio raio de Schwarzschild é menor para as estrelas de grande massa do que para as de pequena massa. Assim, uma estrela com 10 massas solares terá, ao atingir aquele raio, uma densidade média de apenas (!) 10^{14} vezes (10^{17} kg por metro cúbico). No capítulo anterior vimos que as estrelas-nêutrons provavelmente têm densidades médias em torno de 10^{18} kg por metro cúbico. Como as evidências a favor da existência das estrelas-nêutrons são muitas, é claro que a matéria pode ser comprimida até atingir estas enormes densidades e, como vemos aqui, uma estrela de 10 massas solares em colapso seria menos densa do que uma estrela-nêutron no instante em que formasse um buraco negro. Naturalmente, um colapso dentro do buraco negro continuaria até ser atingida uma densidade infinita, mas permanece o fato de que os buracos negros podem se formar ao redor da matéria com densidades menores que aquelas que já se acredita existirem em objetos conhecidos.

Levando esta questão um pouco mais adiante (Quadro 2), vemos, por exemplo, que um buraco negro contendo 100 milhões (10^8) de massas solares teria um raio de cerca de 300 milhões de quilômetros (duas vezes o raio da órbita da Terra) e a densidade média do material em colapso até o horizonte dos eventos formado seria aproximadamente a mesma da água. Um buraco negro com poucos bilhões de massas solares se formaria a uma densidade comparável àquela do ar que nós respiramos. Deve-se enfatizar que, uma vez que uma dada massa seja comprimida dentro do seu raio de Schwarzschild, nada pode evitar seu

colapso subseqüente indefinido; mas para *formar* o buraco negro não é necessariamente exigida uma incrível compressão.

No Universo podemos encontrar buracos negros entre duas ou três e cerca de 100 massas solares resultantes de colapsos estelares. Buracos negros supermaciços, contendo milhares, milhões ou bilhões de massas solares podem também existir e estarem se formando ou crescendo no Universo hoje. Já se aventou a hipótese de que, se o Universo começou em uma grande explosão densa e quente, as condições nos primeiros momentos podem ter sido tais que pequenas quantidades de matéria-prima podiam ter sido comprimidas suficientemente para formar miniburacos negros. A massa de uma montanha podia estar contida dentro de um buraco negro aproximadamente do tamanho de um núcleo atômico e pode ser que tais objetos existam. Teremos mais a dizer a respeito de maxi e miniburacos negros nos próximos capítulos, mas neste momento basta observar que os buracos negros podem atingir uma colossal variedade de tamanho e de massa.

Próximo do horizonte dos eventos

NA VIZINHANÇA de um buraco negro de Schwarzschild não giratório, numerosos efeitos curiosos são esperados. Investiguemos um buraco negro com 10 massas solares mediante uma experiência hipotética (uma "experiência-*gedanken*" ou "experiência-raciocínio") mediante a qual um astronauta voluntário – no interesse da ciência ou talvez para evitar o imposto de renda – concorde em mergulhar no buraco negro, enviando informações até onde for possível. Ele verifica que esta é uma missão sem volta: uma vez que tenha cruzado o horizonte dos eventos não haverá como retornar. Nós – mais prudentemente – observaremos os eventos de uma distância segura, bem além do horizonte dos eventos.

Um efeito bastante desagradável ao qual o astronauta estaria sujeito seriam as forças gravitacionais periódicas. Como vimos no Capítulo 3, as forças periódicas responsáveis pelas marés surgem em conseqüência da diferença de atração gravitacional exercida sobre diferentes partes do corpo. De pé sobre a superfície da Terra (mesmo ignorando os efeitos do Sol e da Lua) estamos sujeitos a efeitos periódicos devidos somente à Terra. Se você se encontra em posição vertical, seus pés estão mais próximos do centro da Terra que sua cabeça, e por esse motivo sujeitos a uma atração mais forte. Certamente os efeitos são infinitesimais

e nem temos consciência deles nem somos capazes de medi-los nas condições habituais.

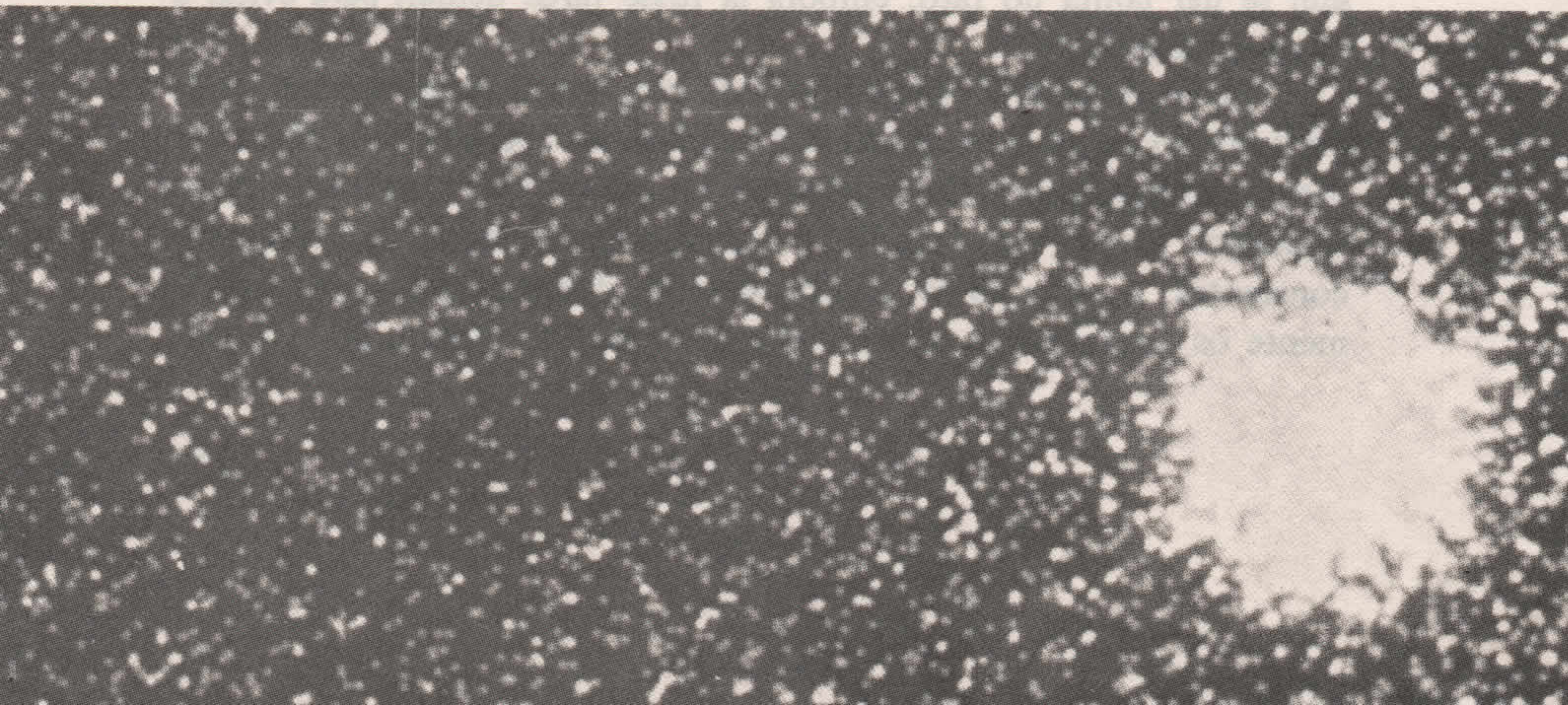
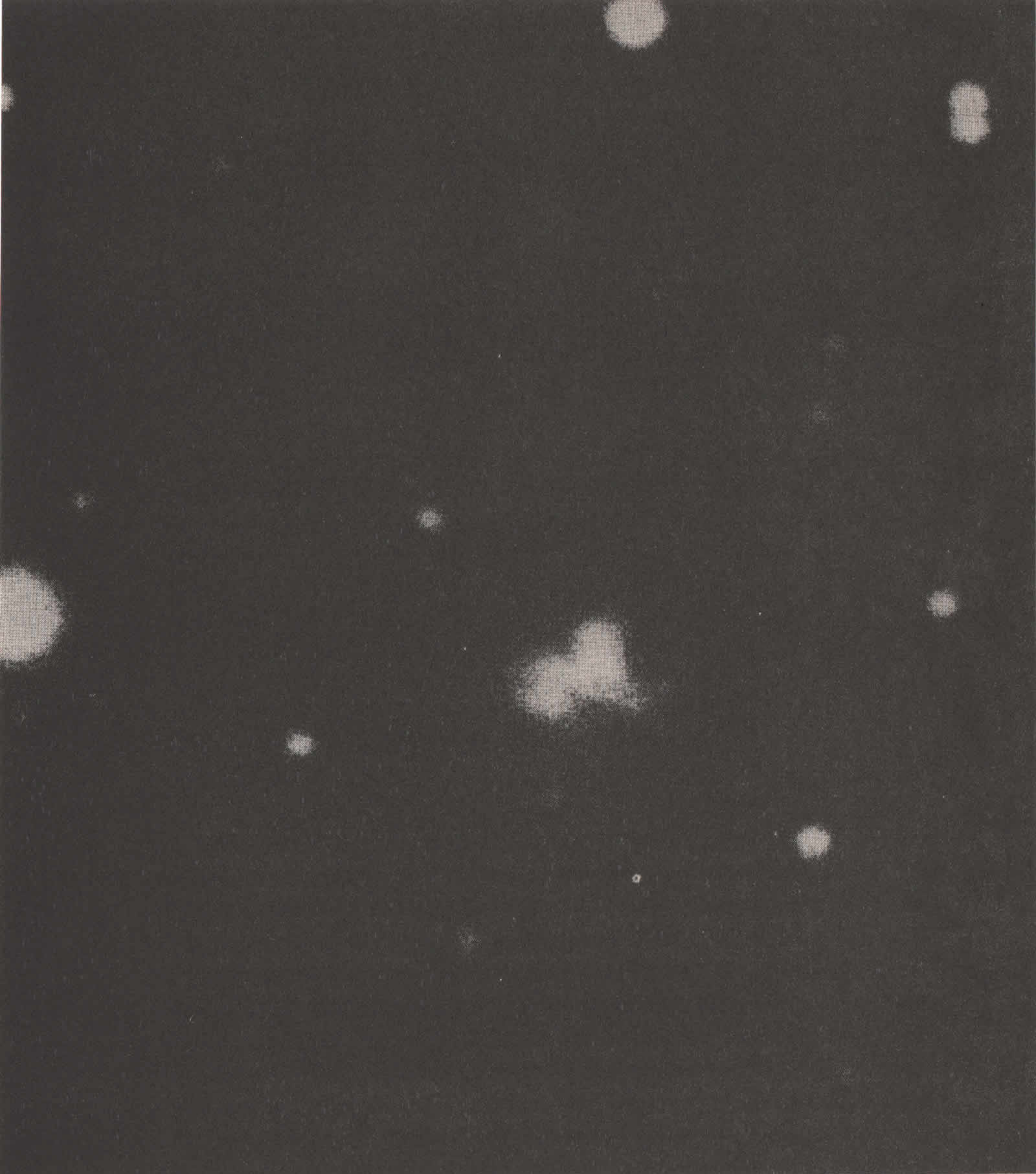
Perto do horizonte dos eventos do nosso buraco negro as coisas são muito diferentes. Nada menos que dez massas solares de matéria são comprimidas dentro de um raio de 30 km e a força gravitacional sobe de forma muito intensa à medida que nos aproximamos do horizonte dos eventos: perto dele, o astronauta em queda estaria sujeito a uma força periódica aproximadamente igual àquela experimentada por alguém pendurado de uma ponte com toda a população de Londres ou de Nova York agarrada em seus tornozelos!

O astronauta seria estirado e despedaçado por uma "cremalheira cósmica" de intensidade cada vez maior muito antes de ter atingido o horizonte dos eventos. Uma vez chegando a ele, seus pedaços dispersos mergulhariam na singularidade central para serem aniquilados da existência. Pelo menos o fim seria misericordiosamente rápido. Caindo virtualmente à velocidade da luz, os pedaços atingiriam a singularidade cerca de um milésimo de segundo após ter cruzado o horizonte.

As forças experimentadas ao nível do horizonte dos eventos são acentuadamente menores em se tratando de buracos negros com maior massa. De fato, as forças periódicas ao nível do horizonte dos eventos são inversamente proporcionais ao quadrado da massa, de tal forma que a tensão periódica experimentada ao entrar em um buraco com 20 massas solares seria apenas um quarto daquela encontrada ao cair em um buraco com 10 massas solares. Se admitirmos, por exemplo, que o corpo humano pode suportar durante um breve período ser esticado por uma força cerca de 10 vezes maior do que o peso do corpo, então um astronauta seria capaz de penetrar o horizonte dos eventos de um buraco com 10 massas solares sem ser despedaçado. Ao nível do horizonte dos eventos de um buraco negro com 100 milhões de massas solares, os efeitos periódicos seriam menores do que os experimentados sobre a Terra devido à própria Terra; seria possível cair em tal buraco sem se dar conta do fato, embora já fosse tarde demais para evitar a eventual destruição.

Se o astronauta estiver equipado com um transmissor que emite um impulso ou sinal em intervalos regulares de acordo com relógio que carrega consigo (seu relógio próprio), do seu próprio ponto de vista os intervalos entre os impulsos transmitidos parecem precisamente constantes. A situação se mostra bastante diferente para nós. Inicialmente os intervalos de tempo entre os sinais que chegam permanecem

Remanescente da supernova Cas A. Fotografia obtida através dos raios X pelo Observatório Einstein mostrando a estrutura do envoltório gasoso em expansão. A Cas A é uma das poderosas fontes de radio no céu e as observações indicam que a explosão responsável pela nuvem em expansão deve ter ocorrido cerca de 300 anos atrás. Estranhamente, não existem quaisquer registros de que tenha sido observada, embora uma supernova normal à mesma distância deva ter sido um objeto brilhante ao olho desarmado. Não pode ser observada qualquer fonte central de raios X, como seria de esperar se o núcleo da supernova se tivesse formado dentro de uma estrela-nêutron. Foi sugerido que o núcleo entrou em colapso diretamente para formar um buraco negro. (Cortesia de S. S. Murray, Divisão de Astrofísica de Alta Energia: Centro de Astrofísica Harvard-Smithsoniano.)

Fotografia obtida com raios X do quasar 3C273 obtida pelo Observatório Einstein. O levantamento realizado por este satélite mostrou que grande quantidade de quasares são poderosas fontes de raios X. (Cortesia da NASA.)

Cisne A. A mais brilhante fonte de rádio no céu, ciincide em posição com a peculiar galáxia mostrada aqui, localizada a uma distância de mais de um bilhão de anos-luz. Pensou-se que este objeto representava duas galáxias em colisão, mas hoje se sabe que se trata de uma galáxia única com dois lobos gigantescos emitindo ondas de rádio. (Fotografia do Observatório de Palomar, Instituto de Tecnologia da Califórnia.)

constantes e estão de acordo com a escala de tempo do astronauta. À medida que ele se aproxima do horizonte dos eventos, as discrepâncias se tornam cada vez mais óbvias: os intervalos entre impulsos sucessivos, de acordo com nossa escala de tempo, se tornam progressivamente mais longos. Do nosso ponto de vista, o relógio do astronauta está sofrendo um retardo devido aos efeitos da dilatação gravitacional do tempo. Quanto mais profundamente ele penetra no campo gravitacional do buraco mais óbvio o efeito se torna (Fig. 32) até que, quando ele atinge o próprio horizonte, concluiríamos que seu relógio parou. Pelo nosso cômputo o astronauta leva um tempo infinito para cruzar o horizonte dos eventos e bem podemos imaginar que, com um telescópio suficientemente poderoso, seríamos capazes de ver uma imagem congelada do voluntário despedaçado, flutuando dentro do buraco negro pelo resto da eternidade.

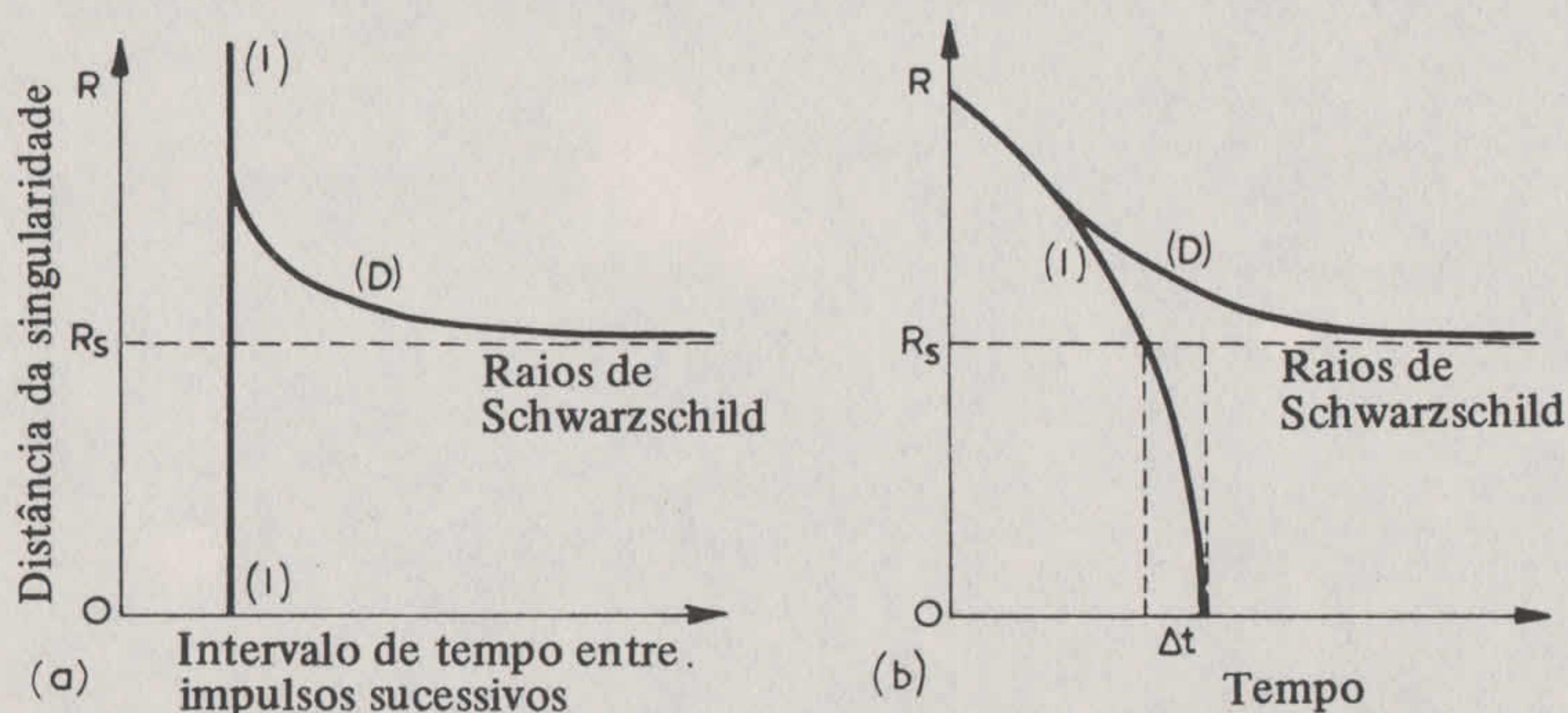



Fig. 32 Visões contrastantes do tempo próximo de um buraco negro. (a) *Um astronauta que esteja caindo dentro de um buraco negro faz sinais a um observador distante emitindo clarões de luz a intervalos que são precisamente regulares de acordo com seu tempo próprio (do astronauta) (I). De acordo com um observador distante (D), o intervalo de tempo entre os clarões recebidos se torna mais longo à medida que o astronauta se aproxima do horizonte dos eventos.* (b) *De acordo com o tempo próprio do astronauta (I), ele continua a acelerar à medida que se aproxima do buraco e, após ter cruzado o horizonte dos eventos, atinge a singularidade central em um período de tempo muito curto (Δt; para um buraco negro de massa estelar típica, Δt deveria ser cerca de um décimo milésimo de segundo). De acordo com D o astronauta nunca chega ali, mas leva um tempo infinito para cruzar o horizonte dos eventos.*

O astronauta vê as coisas de forma muito diferente. De acordo com seu relógio – e qualquer outro meio de medida do tempo, sejam relógios atômicos, relógios biológicos ou o que quer que seja – o tempo está fluindo da forma usual, em velocidade uniforme. Ele cruza o horizonte dos eventos e mergulha na singularidade central em uma pequena fração de segundos; isto é muito real, penoso e o fim para ele. Entretanto, nós concluímos que ele jamais cruzou o horizonte dos eventos.

Quem está com a razão? Ambos, ou ninguém, de acordo com seu ponto de vista. Estamos certos quanto às observações feitas de acordo com o nosso referencial; tal como o astronauta está certo quanto às suas deduções, feitas de acordo com seu referencial. Não existe nenhum padrão absoluto de tempo no Universo: ambos os observadores estão certos em relação aos seus pontos de vista.

Entretanto, a mesma linha de raciocínio poderia ser aplicada à estrela em fase de colapso que vai formar o buraco negro. Se observássemos uma estrela em colapso veríamos este colapso diminuir de velocidade e parar exatamente ao atingir o raio de Schwarzschild e uma imagem congelada da estrela permaneceria diante de nós (um "quase buraco negro"). Na prática isto não seria assim. Outro efeito relativístico, intimamente relacionado com a dilatação gravitacional do tempo, desempenha um papel – o desvio gravitacional para o vermelho. Na verdade, o desvio gravitacional para o vermelho e a dilatação do tempo fazem parte do mesmo fenômeno. Próximo do horizonte dos eventos o desvio para o vermelho se torna ainda mais poderoso. À medida que a estrela em colapso se aproxima cada vez mais de seu raio de Schwarzschild, os comprimentos de onda das radiações emitidas de sua superfície se tornam progressivamente mais desviados para o vermelho ao atingirem a fração do espectro de ondas mais longas, tornando-se progressivamente mais fracas à medida que isto ocorre. A freqüência da radiação declina rapidamente até que o intervalo de tempo entre a penúltima e a última crista de onda ao atingir o observador distante se torna infinitamente longo. Em conseqüência, a estrela em colapso (ou o astronauta que mergulhou no buraco negro) se desvanece da nossa visão dentro de uma pequena fração de segundo após atingir o horizonte dos eventos.

Se outro astronauta é enviado para verificar se o primeiro caiu ou não através do horizonte dos eventos, nunca o alcançará. O primeiro astronauta caiu primeiro e o segundo, também, de acordo com seu pró-

prio tempo, mergulha muito depressa para o mesmo destino do primeiro. Na prática, então, os buracos negros se formarão, as estrelas em colapso desaparecerão da nossa vista e os astronautas ali caídos desaparecerão dentro deles. Nenhuma observação, a partir de qualquer referencial, pode mostrar outra coisa.

Dentro do buraco negro

NÃO PODEMOS observar o interior de um buraco negro a partir do lado de fora. Embora um astronauta pudesse, em princípio, durante sua queda, fazer observações do interior – particularmente se ele escolher um buraco negro de grande massa, onde poderia permanecer horas ou mesmo dias antes de ser despedaçado pelas forças gravitacionais – ele seria incapaz de comunicar esta informação para nós sem a ajuda de sinais mais rápidos do que a luz, o que não é possível. Não obstante, temos grande confiança de que a Relatividade Geral possa ser usada para descrever o interior do buraco negro perfeitamente, sem excluir a própria singularidade.*

Encontramos o conceito de diagrama espaço-tempo no Capítulo 4. Podemos usar uma espécie de mapa do espaço-tempo criado pelo professor Roger Penrose, da Universidade de Oxford, e aqui designado como o diagrama de Penrose, para esquematizar o buraco negro e o resto do Universo em uma única folha de papel.

Qualquer mapa introduz distorções – por exemplo, a familiar projeção de Mercator usada nos mapas terrestres representa os detalhes próximos ao equador de forma bastante fiel, mas introduz distorções progressivamente maiores próximo aos pólos. A técnica de Penrose (conhecida como mapa conformal) produz um mapa do espaço-tempo de um buraco negro de Schwarzschild semelhante ao que vemos na Fig. 33. Todo o espaço-tempo exterior ao buraco negro está representado no segmento do lado direito do diagrama, enquanto as linhas da borda direita representam regiões infinitamente distantes do espaço-tempo partindo do passado infinito (embaixo) até o futuro infinito (em

* Uma implicação deste fato é que em nenhum ponto de sua queda em direção à singularidade o astronauta excederia a velocidade da luz medida localmente. De acordo com a teoria newtoniana o astronauta sofreria uma aceleração cada vez maior, atingindo a singularidade com uma velocidade indefinidamente elevada, muito além da velocidade da luz.

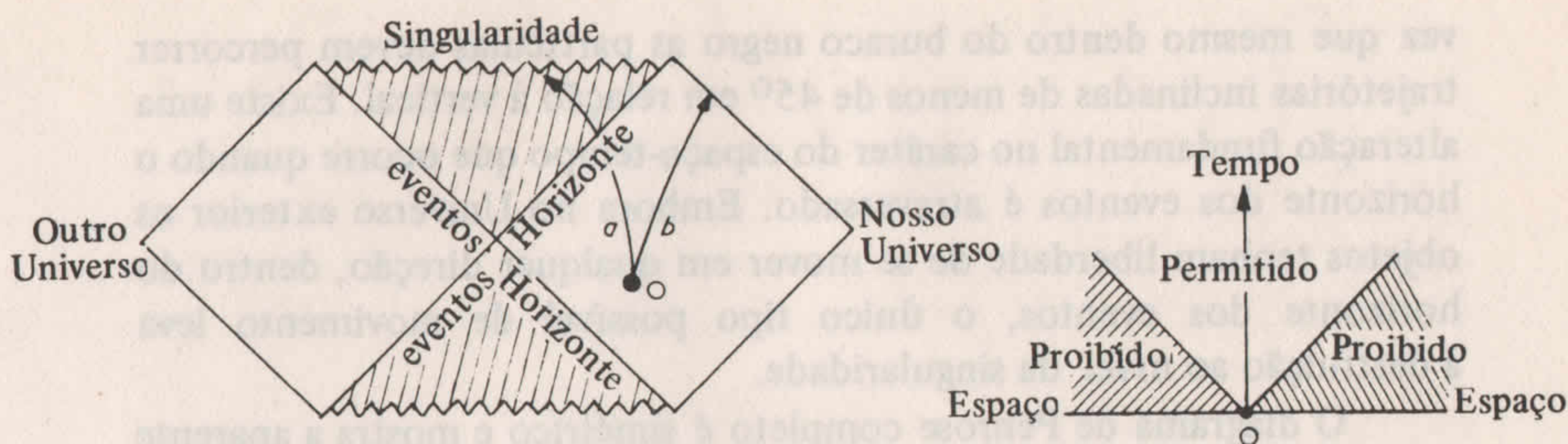



Fig. 33 Mapa do espaço-tempo (Diagrama de Penrose para um buraco negro de Schwarzschild). *O tempo é indicado na direção vertical e o espaço na direção horizontal (detalhes sobre o processo de mapeamento são fornecidos no texto). Nosso Universo localiza-se no lado direito do diagrama, mas parece existir outro Universo, inacessível, à esquerda. As partículas materiais devem seguir trajetórias semelhantes ao tempo — isto é, as linhas inclinadas em relação ao eixo vertical de menos de 45º — e por esse motivo é claro que qualquer partícula* a *que cruze o horizonte de eventos deva atingir a singularidade; a partícula* b *permanece segura exteriormente ao horizonte dos eventos. (Compare com a Fig. 35.)*

cima). O horizonte dos eventos é representado por linhas inclinadas em relação à vertical (direção do tempo) de ângulos de 45º. Nos diagramas de espaço-tempo que encontramos anteriormente tais linhas representavam a trajetória dos raios de luz. Partículas de movimento mais lento possuem linhas de Universo inclinadas de menos de 45º (isto é, seguem trajetórias semelhantes do tempo). Como um raio de luz dirigido para fora do horizonte dos eventos permanece a uma distância constante da singularidade, embora um observador que esteja caindo lá dentro ainda conclua que o raio estava viajando à velocidade da luz (achatando-se até parar), parece razoável indicar o horizonte por linhas inclinadas desta maneira. A singularidade aparece no mapa como uma linha horizontal que passa pelo alto do diagrama; a singularidade é semelhante ao espaço.

Uma partícula que caia em um buraco negro deve seguir uma trajetória semelhante ao tempo, porque nada pode exceder a velocidade da luz. Olhando para o mapa, é claro que nada que caia em um buraco de Schwarzschild pode evitar a queda até a singularidade central, uma

vez que mesmo dentro do buraco negro as partículas devem percorrer trajetórias inclinadas de menos de 45° em relação à vertical. Existe uma alteração fundamental no caráter do espaço-tempo que ocorre quando o horizonte dos eventos é atravessado. Embora no Universo exterior os objetos tenham liberdade de se mover em qualquer direção, dentro do horizonte dos eventos, o único tipo possível de movimento leva à destruição ao nível da singularidade.

O diagrama de Penrose completo é simétrico e mostra a aparente existência do outro Universo do "outro lado" do buraco negro. As soluções das equações que descrevem o espaço-tempo nas vizinhanças de um buraco negro de Schwarzschild apresentam uma simetria que sugere que um buraco negro liga o nosso Universo com outro. Ampliando a analogia da lâmina de borracha, que vimos em um capítulo anterior, o afundamento na lâmina de borracha representando um buraco negro em nosso Universo eventualmente se abre em outra lâmina representando outro espaço-tempo assintoticamente plano – outro Universo.

Teria este "outro Universo" algum significado físico ou representa simplesmente uma curiosidade matemática decorrente da natureza das soluções das equações?* A questão é inteiramente hipotética no caso dos buracos negros de Schwarzschild, porque não há nenhum meio de atingir o outro Universo, de enviar um sinal até ele ou receber um sinal vindo dele. Tudo que entra no buraco negro cai na singularidade. Para fazer uma viagem até o outro Universo, ou para algo penetrar em nosso Universo vindo do outro, estaria envolvida uma velocidade maior do que a luz, o que não é possível. O conceito do outro Universo pareceria assim apenas uma curiosidade matemática. Não obstante, o elo hipotético entre dois Universos, a ponte Einstein-Rosen – ou o buraco de verme – despertou grande interesse. Especulou-se que, em vez de ligar dois Universos, a ponte podia colocar em contato pontes diferentes do nosso próprio Universo. Seja como for, viajar de uma localização no espaço-tempo para outra através de um buraco negro de Schwarzschild

* Freqüentemente encontramos problemas matemáticos que têm duas soluções, uma das quais tem significado físico enquanto a outra é rejeitada como não tendo significado. A raiz quadrada de um número é um desses casos; por exemplo, a raiz quadrada de 64 é + 8 ou – 8 ($+8 \times +8 = -8 \times -8 = 64$). Consideremos a terceira lei de Kepler: se um planeta se move em torno do Sol a uma distância (a) de quatro unidades astronômicas, a lei nos diz que o período orbital (P) em anos é dado por $P^2 = a^3$. Neste caso $P^2 = 4^3 = 64$ e o período em anos é a raiz quadrada de 64. Ficamos satisfeitos em admitir que o período é de 8 anos ao invés de – 8 anos.

não pode ser realizado por causa da impossibilidade de evitar a singularidade.

Quanto à singularidade em si mesma, podemos dizer pouco a respeito dela uma vez que nossas leis físicas não podem lidar com matéria infinitamente comprimida e gravidade infinitamente poderosa. Penrose e outros demonstraram de forma convincente que o colapso de uma massa de matéria sempre levará à formação de uma singularidade e que – pelo menos no caso de colapso simetricamente esférico – um horizonte de eventos sempre se formará para ocultar a singularidade dos observadores externos. Uma singularidade representa uma região na qual nossas leis da Natureza não funcionam e um físico não pode fazer previsões sobre o que acontecerá em tal ponto ou o que emergirá dali. Se as singularidades pudessem ser vistas diretamente – se existissem *singularidades nuas* – então a nossa capacidade de prever a evolução dos acontecimentos no Universo seria solapada; a singularidade podia sempre colocar um fator imprevisível. Se as singularidades estão sempre ocultas decentemente pelos horizontes dos eventos, então o que quer que aconteça ao nível das singularidades não pode afetar o Universo exterior a estes horizontes dos eventos. Se elas são inobserváveis, então talvez possam ser ignoradas.

É menos claro se um horizonte de eventos sempre se forma em torno de todo tipo de corpo em fase de colapso. Com o colapso de uma massa esférica para formar um buraco negro desprovido de rotação, não há dúvida de que se forma um horizonte de eventos, mas o colapso de um corpo não esférico ou muito perturbado coloca problemas. Acredita-se amplamente, depois do trabalho de Penrose, que existe um princípio de *censura cósmica*, o que implica que o Universo é constituído de tal maneira que as singularidades estão sempre ocultas atrás dos horizontes de eventos, mas não foi provado rigorosamente para outros casos diferentes do colapso esférico retilíneo e possivelmente idealizado.

A gravidade dentro de um buraco negro domina todas as outras forças mas, se o censor cósmico nunca dorme, não podemos ter esperanças de observar as conseqüências desta dominação sobre a singularidade central.

8
Buracos Negros Giratórios

O BURACO NEGRO de Schwarzschild que estivemos considerando até agora é fisicamente irreal sob um aspecto importantíssimo. Se os buracos negros existem realmente eles terão de ter se formado a partir de corpos giratórios (isto é, corpos possuidores de momento angular), os quais podem mesmo possuir uma carga elétrica determinada. Embora a maior parte dos corpos existentes no Universo sejam mais ou menos eletricamente neutros, a rotação é uma propriedade comum às estrelas, planetas e galáxias. Como um buraco negro se forma em conseqüência do colapso de uma estrela giratória, seria de esperar que o buraco negro girasse com certa rapidez; afinal, sabemos que as estrelas-nêutrons giram realmente muito depressa.

Em conseqüência do trabalho realizado por B. Carter, W. Israel, D. C. Robinson e S. W. Hawking, foi demonstrado que os buracos negros, do ponto de vista do observador externo, só podem possuir três características distintas. Todas as propriedades de um buraco negro são determinadas por sua massa (M), sua carga elétrica (Q) e seu momento angular (J). A razão pela qual estas propriedades são preservadas é a associação das mesmas com campos de longo alcance que podem exercer influência a grandes distâncias. O campo gravitacional associado a M e J diminui a intensidade com o quadrado da distância, mas não obstante se estende até um alcance infinito; a força eletromagnética associada a Q se comporta de forma similar. Quando um buraco negro se

forma, o campo gravitacional além do seu horizonte de eventos continua a afetar o movimento dos raios e dos objetos materiais. De forma semelhante, o campo eletromagnético associado a qualquer carga possuída pelo buraco negro influenciará seus arredores. *Nenhuma das outras propriedades da matéria que contribuiu para a formação do buraco é preservada*. Este aspecto dos buracos negros foi sintetizado muito bem pelo professor J. A. Wheeler ao fazer a seguinte observação: "Um buraco negro não tem cabelo", isto é, um corpo que entra em colapso chegará rapidamente a um estado caracterizado apenas por massa, carga e momento angular. O buraco negro não possui qualquer outra característica diferençável – cabelo, barba, bigode ou seja lá o que for. Na verdade, um buraco negro formado por 10 massas solares de memorandos governamentais não poderia ser distinguido de outro formado pelo colapso de uma estrela de 10 massas solares, desde que a massa inicial de matéria possua o mesmo grau de rotação e carga elétrica. Os buracos negros são entidades bastante inescrutáveis.

Resolver as equações de campo para corpos de grande massa em estado de colapso, possuidores de carga e momento angular, mostrou-se uma tarefa difícil. Entre 1916 e 1918, H. Reissner e G. Nordstrøm encontraram soluções para buracos negros possuidores de massa M e carga Q, mas só em 1963 o matemático australiano Roy P. Kerr encontrou uma solução para um buraco negro com massa M e momento angular J. Somente a partir daí foi possível discutir modelos reais de buracos negros. Cerca de dois anos mais tarde E. T. Newman e outros obtiveram soluções envolvendo M, J e Q, todas as possíveis características possuídas pelos buracos negros. As soluções de Kerr e Newman parecem abranger todos os possíveis buracos negros.

Na verdade, parece improvável que possam existir buracos negros com carga elétrica significativa – pelo menos durante muito tempo. Se um buraco negro se forma, digamos, com uma forte carga positiva, atrai cargas negativas da sua vizinhança e tende a repelir as cargas positivas. Após certo período de tempo absorverá cargas suficientes para neutralizar sua carga original.

Os buracos negros giratórios possuem certo número de propriedades fascinantes tanto dentro quanto fora do horizonte dos eventos. Fora deste está uma região conhecida como *ergosfera* (Fig. 34) limitadada por uma superfície conhecida como o *limite estacionário* (não se trata, sem dúvida, de uma superfície sólida ou tangível). O limite estacionário toca o horizonte dos eventos em seus "pólos" e se dilata até a sua

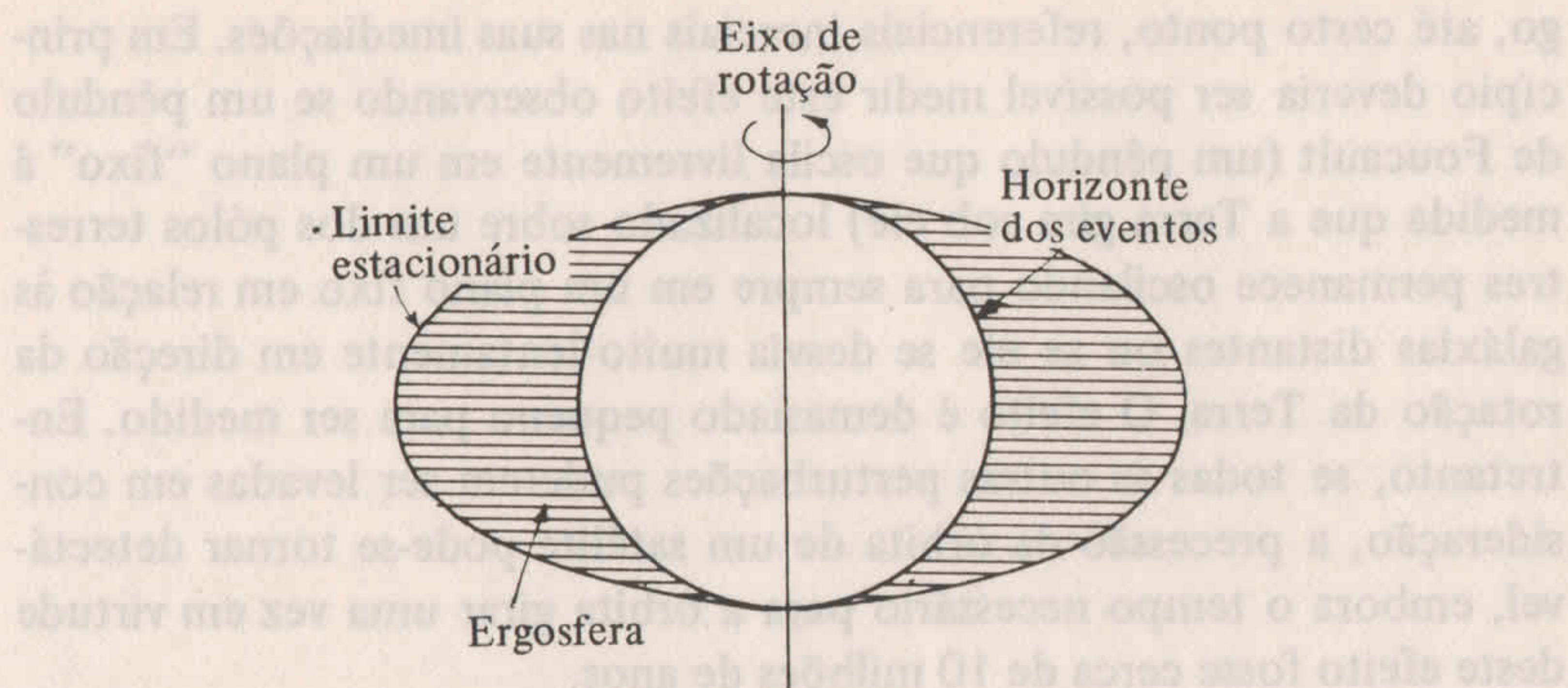



Fig. 34 Um buraco negro giratório (de Kerr). *Externamente ao horizonte dos eventos de um buraco negro giratório acha-se uma região conhecida como a ergosfera. Nada que esteja localizado dentro da ergosfera pode impedir seu próprio arrastamento pela rotação do buraco. O limite da ergosfera é denominado limite estacionário, uma vez que uma partícula ali situada poderia evitar o arrastamento se fosse capaz de viajar à velocidade da luz. É possível para uma partícula penetrar na ergosfera e escapar, ganhando energia no processo (veja texto).*

maior extensão ao nível do "equador". Dentro do limite estacionário nada pode permanecer parado: mesmo se você estivesse em um foguete capaz de atingir quase a velocidade da luz, seria incapaz de evitar ser arrastado pela rotação do buraco; é como se o próprio espaço estivesse sendo arrastado ao redor do buraco. Em princípio, uma espaçonave poderia penetrar na ergosfera e deixá-la novamente disparando seus motores em uma direção que a afastaria do horizonte dos eventos, mas não existe nenhuma forma pela qual a espaçonave (ou um raio de luz) pudesse permanecer estacionário dentro desta região.

O efeito é conhecido como a "dragagem de referenciais inerciais" de Lence-Thirring. Podemos ter uma certa idéia de como isto aconteceria voltando ao princípio de Mach, a idéia de que todo corpo no Universo contribui para a propriedade da inércia de qualquer outro corpo. Sob circunstâncias normais é a matéria mais distante no Universo que faz a maior contribuição para a propriedade da inércia, mas os corpos locais também podem ter algum efeito, muito embora microscópico. Um gigantesco corpo giratório deveria portanto arrastar consi-

go, até certo ponto, referenciais inerciais nas suas imediações. Em princípio deveria ser possível medir este efeito observando se um pêndulo de Foucault (um pêndulo que oscila livremente em um plano "fixo" à medida que a Terra gira sob ele) localizado sobre um dos pólos terrestres permanece oscilando para sempre em um plano fixo em relação às galáxias distantes ou se ele se desvia muito lentamente em direção da rotação da Terra. O efeito é demasiado pequeno para ser medido. Entretanto, se todas as outras perturbações puderem ser levadas em consideração, a precessão da órbita de um satélite pode-se tornar detectável, embora o tempo necessário para a órbita girar uma vez em virtude deste efeito fosse cerca de 10 milhões de anos.

Em 1969 Roger Penrose sugeriu uma forma pela qual a energia poderia ser extraída da ergosfera de um buraco negro. Se uma partícula possuidora de certa quantidade de energia penetrasse na ergosfera e então explodisse em dois fragmentos de tal maneira que um destes possuísse energia negativa (e o momento angular oposto ao do próprio buraco negro), o fragmento de energia negativa cairia no buraco negro enquanto o outro fragmento, para conservar a total quantidade de energia e momento, escaparia da ergosfera com mais energia do que a energia original possuída pela partícula completa a princípio. Essa energia da partícula fugitiva poderia ser utilizada.

O efeito da partícula caída dentro do buraco negro seria *reduzir* a massa-energia total do mesmo e repetidas aplicações do processo poderiam resultar na extração de uma considerável fração dessa massa-energia. Existe um limite. O efeito de deixar cair partículas com rotação oposta no buraco é diminuir a rotação do mesmo; quando esta tiver cessado, não se pode mais extrair energia por este processo. Se começarmos com um buraco negro girando com máxima velocidade permitida (o máximo buraco negro de Kerr), reduzindo sua rotação final a zero podemos extrair 29 por cento da massa-energia inicial do buraco, o que constitui uma grande quantidade de energia: os processos nucleares que se passam dentro das estrelas não são nem de longe tão eficientes, uma vez que menos de um por cento da massa envolvida nessas reações é convertida em energia. O processo de Penrose levanta a possibilidade de que buracos negros giratórios possam constituir os dínamos centrais responsáveis por algumas das mais poderosas fontes de energia do Universo.

Um importante teorema relativo aos buracos negros e à possibilidade de extrair energia dos mesmos foi demonstrado em 1971 pelo

professor S. W. Hawking, da Universidade de Cambridge, tendo sido obtida uma forma anterior cerca de um ano antes por D. Christodolou. Trata-se do *teorema da área*, o qual estabelece, em essência, que a área do horizonte dos eventos de um buraco negro não pode diminuir: seja lá o que for que aconteça ao buraco negro, sua "área superficial" deve ou aumentar ou permanecer a mesma. A área superficial de um buraco negro depende do quadrado de sua massa (o raio de um buraco negro é proporcional a sua massa e a área superficial de uma esfera é proporcional ao quadrado de seu raio). Se considerarmos o caso simples da colisão e da coalescência de dois buracos negros idênticos, uma certa quantidade de massa pode ser perdida – irradiada para fora sob a forma de ondas gravitacionais – no processo. A maior perda possível de massa ocorreria se a área superficial do buraco negro resultante fosse precisamente igual à área total dos buracos originais e isto nos fornece um limite superior para a energia liberada em tal processo. Também aqui a máxima quantidade de energia que poderia ser liberada teoricamente chega a 29 por cento da massa-energia total dos dois buracos negros originais. Na prática, tal evento é altamente improvável e, se ocorresse, os cálculos indicam que a liberação total de energia seria substancialmente menor do que esta cifra.

Como veremos mais tarde, os buracos negros podem representar fontes substanciais de energia. Mesmo um buraco não giratório de Schwarzschild poderia proporcionar um poço gravitacional bastante profundo para liberar mais energia do que a fusão termonuclear. Exemplificando: nuvens de matéria caindo em direção ao horizonte dos eventos de um buraco negro se aqueceriam intensamente em virtude de colisões entre partículas em rápida aceleração e emitiriam grandes quantidades de radiação eletromagnética, particularmente sob a forma de raios X, antes de desaparecerem do nosso campo de visão dentro do horizonte. Com efeito, a matéria localizada a certa distância de um buraco negro possui uma considerável quantidade de energia potencial. À medida que se aproxima do buraco, a matéria transforma sua energia potencial em energia cinética, certa quantidade da qual pode ser liberada sob a forma de calor ou outras formas de radiação, tal como a energia cinética de uma rocha em queda livre se dissipa quando essa rocha atinge o solo sob a forma de calor, som e ondas de choque.

Embora os buracos negros *sejam* negros e não possam emitir radiação de dentro de seus horizontes dos eventos, seus poderosos campos gravitacionais poderiam torná-los as mais poderosas fontes de energia do

Universo em virtude da energia liberada pela matéria que neles penetra antes de cruzar seus horizontes.

O interior de um buraco negro giratório

O INTERIOR de um buraco negro giratório (ou carregado) é muito diferente do interior de um buraco negro desprovido de rotação, como o de Schwarzschild. A singularidade central assume a forma de um anel e se a representarmos em um mapa de espaço-tempo verificaremos que – ao contrário da singularidade de Schwarzschild – ela é vertical, paralela à direção do tempo do diagrama de Penrose. Em outras palavras, a singularidade é *tempiforme*. Isto implica que é possível tomar uma rota no buraco negro giratório capaz de evitar a singularidade central e suas horripilantes tensões gravitacionais. De fato, um objeto teria de ser dirigido com bastante cuidado para atingir a singularidade de um buraco negro de Kerr: somente aqueles que penetrassem ao longo do plano equatorial atingiriam a singularidade e seriam destruídos.

O diagrama total de Penrose para um buraco negro giratório revela que tal buraco possui dois horizontes dos eventos, um horizonte externo e outro mais próximo da singularidade. Dentro do horizonte externo, um corpo não pode evitar de cair para dentro, uma vez que ao cruzar este horizonte, como já vimos, as propriedades do espaço e do tempo mudam de tal forma a impedir que ocorra o movimento em qualquer direção desejada. Ao cruzar o horizonte dos eventos interno as propriedades do espaço e do tempo mudam novamente e aí se torna possível mover-se em direções que afastem o corpo em queda para longe da singularidade. Podemos traçar o progresso de um astronauta em queda na Fig. 35. Dentro do horizonte dos eventos interno ele pode usar seus foguetes para alterar sua rota. Sem exceder a velocidade da luz (isto é, sem tomar uma trajetória inclinada mais de 45º em relação ao eixo vertical) ele pode evitar a singularidade e afastar-se dela, eventualmente emergindo em um novo espaço-tempo. Resumindo, após ter caído em um buraco negro em nosso Universo, ele pode reemergir desse buraco: portanto, pode emergir “em algum lugar” e esse lugar pareceria *outro Universo*.

O diagrama de Penrose, bem estudado, indica que pode haver um número infinito de Universos passados e futuros. Entrando e saindo de

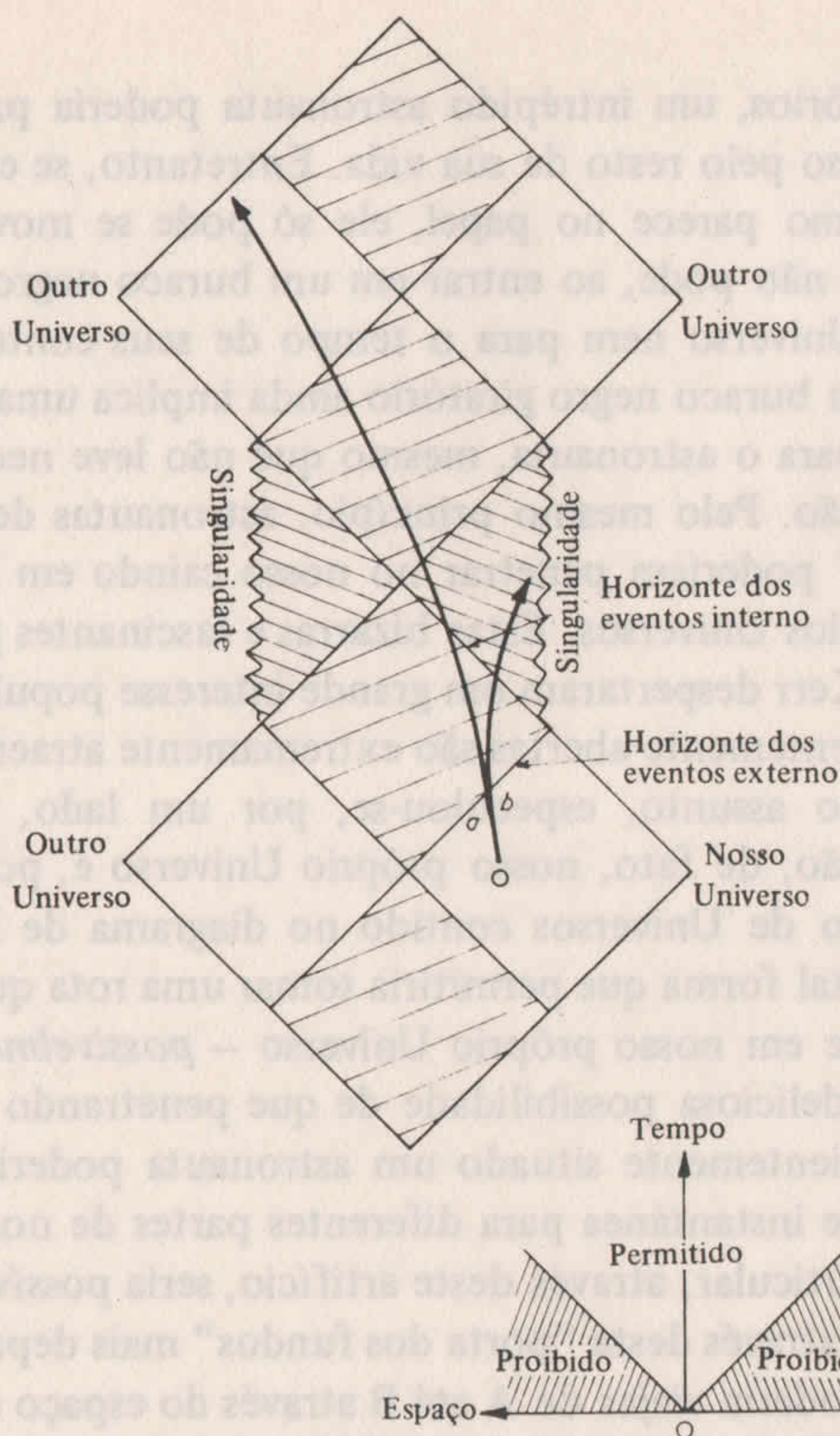



Fig. 35 Mapa do espaço-tempo de um buraco negro giratório (de Kerr). *Um buraco negro giratório contém um horizonte dos eventos exterior e outro interior, tendo o espaço-tempo dentro do horizonte interno propriedades do espaço-tempo entre os horizontes. A singularidade é tempiforme – isto é, localiza-se na posição vertical do mapa – e, em conseqüência uma partícula que penetre nesta espécie de buraco pode,* em princípio, *evitar chegar à singularidade. O mapa revela que, aparentemente, um buraco negro giratório interliga nosso Universo com um número infinito de "outros Universos"; em teoria, um astronauta poderia penetrar no buraco negro ao longo de uma trajetória* a *que emergiria em outro Universo; poderia, naturalmente, escolher uma trajetória* b *que encontraria a singularidade. Existem dúvidas consideráveis se o mapa representa a situação física real dentro de um buraco negro giratório. (Comparar com a Fig. 33.)*

buracos negros giratórios, um intrépido astronauta poderia passar de Universo para Universo pelo resto de sua vida. Entretanto, se esta imagem está correta como parece no papel, ele só pode se mover para "Universos futuros"; não pode, ao entrar em um buraco negro, voltar para o seu próprio Universo nem para o tempo de seus contemporâneos. Penetrar em um buraco negro giratório ainda implica uma viagem em uma só direção para o astronauta, mesmo que não leve necessariamente a sua destruição. Pelo mesmo princípio, astronautas de outros "Universos passados" poderiam penetrar no nosso caindo em buracos negros em seus próprios Universos. Estas bizarras e fascinantes propriedades da solução de Kerr despertaram um grande interesse popular, pois as possibilidades aparentemente abertas são extremamente atraentes.

Para estender o assunto, especulou-se, por um lado, que os "outros Universos" são, de fato, nosso próprio Universo e, por outro lado, que o conjunto de Universos contido no diagrama de Penrose pode estar ligado de tal forma que permitiria tomar uma rota que eventualmente reemergisse em nosso próprio Universo – *possivelmente no passado*. Isto traz a deliciosa possibilidade de que penetrando em um buraco negro convenientemente situado um astronauta poderia viajar de forma virtualmente instantânea para diferentes partes de nosso próprio Universo. Em particular, através deste artifício, seria possível ir do ponto A ao ponto B através desta "porta dos fundos" mais depressa do que um raio de luz poderia viajar de A até B através do espaço normal. Na verdade, seria possível para um astronauta fazer uma jornada e voltar para casa antes de ter saído!

Como já discutimos no Capítulo 4, a lei fundamental da causalidade – que nos diz que a causa deve preceder o efeito – seria destruída por tal possibilidade. Se a causalidade fosse destruída o Universo seria um local totalmente irracional e imprevisível. Se fosse possível o transporte mais rápido do que a luz através dos buracos negros, isto teria conseqüências alucinantes. Para manter a sanidade do Universo, temos um interesse velado que não seja possível usar os buracos negros desta maneira.

Evidentemente, existe uma grande objeção prática a este modo de transporte: qualquer espaçonave que se aproximasse do horizonte dos eventos de um buraco negro de massa estelar seria despedaçada pelas forças gravitacionais. Isto, por si só, não elimina a possibilidade de que partículas ou informações pudessem ser comunicadas violando a causalidade. Em qualquer caso, diante de buracos negros com massas gigantes-

cas, o problema da tensão gravitacional não surgiria: os astronautas que se aventurassem em um buraco negro com um bilhão de massas solares completariam sua "jornada" sem sentir qualquer desconforto.

A objeção às viagens através de buracos giratórios pode ser muito mais fundamental. Existem numerosos indícios teóricos que sugerem que o interior de um buraco negro de Kerr (ou de um buraco negro carregado) está demasiadamente idealizado e que em um buraco negro real não existiria a ponte entre o espaço e o tempo. Os modelos de Kerr e Newman tratam os buracos negros como se eles existissem isoladamente dentro de um espaço-tempo horizontal e assim ignoram os efeitos da matéria em sua vizinhança, assim como os possíveis efeitos quânticos, o que poderia ser altamente significativo. Em 1978, por exemplo, N. D. Birrell e P. C. W. Davies demonstraram que os efeitos quânticos destruiriam a ponte entre o espaço e o tempo em um buraco negro carregado e argumentos similares também podem ser aplicados aos giratórios. Na prática, a singularidade de um buraco negro giratório real pode se mostrar espaciforme e o destino de qualquer astronauta ali caído seria a aniquilação na singularidade, tal como se tivesse caído em um buraco negro de Schwarzschild.

Sob certo aspecto é triste perder uma possibilidade tão excitante como seja viajar através dos buracos negros. Entretanto, esta possibilidade ainda existe, porque estamos muito longe de compreender inteiramente o que ocorre no interior dos buracos negros giratórios, embora a tendência atual da pesquisa seja bastante contrária à capacidade de utilizá-los como sistemas de trânsito rápido.

Singularidades nuas

NO CAPÍTULO 7 encontramos o princípio de censura cósmica pelo qual se propõe que singularidades nuas não podem existir, isto é, que todas as singularidades existentes na natureza estão circundadas por horizontes dos eventos que impedem que sejam vistas pelo Universo exterior. Podem os buracos negros carregados ou giratórios possuir singularidades nuas? As equações que descrevem soluções de Kerr-Newman demonstram que se a carga ou o momento angular de um buraco negro excederem certos valores críticos, o horizonte dos eventos desapareceria. Se considerarmos um buraco negro girando com a máxima velocidade permitida (ou possuindo a máxima carga possível), poderíamos

destruir o horizonte dos eventos e revelar a singularidade central arremessando no buraco partículas que lhe adicionariam suficiente momento angular ou carga?

Parece que isto não ocorreria na prática. O que importa é a relação entre o momento angular e a massa (ou entre a carga e a massa) e o processo de lançar partículas através do horizonte dos eventos acrescentaria apenas massa-energia suficiente' para aumentar a massa do buraco negro suficientemente para evitar o desaparecimento do horizonte e a emergência de uma singularidade nua.

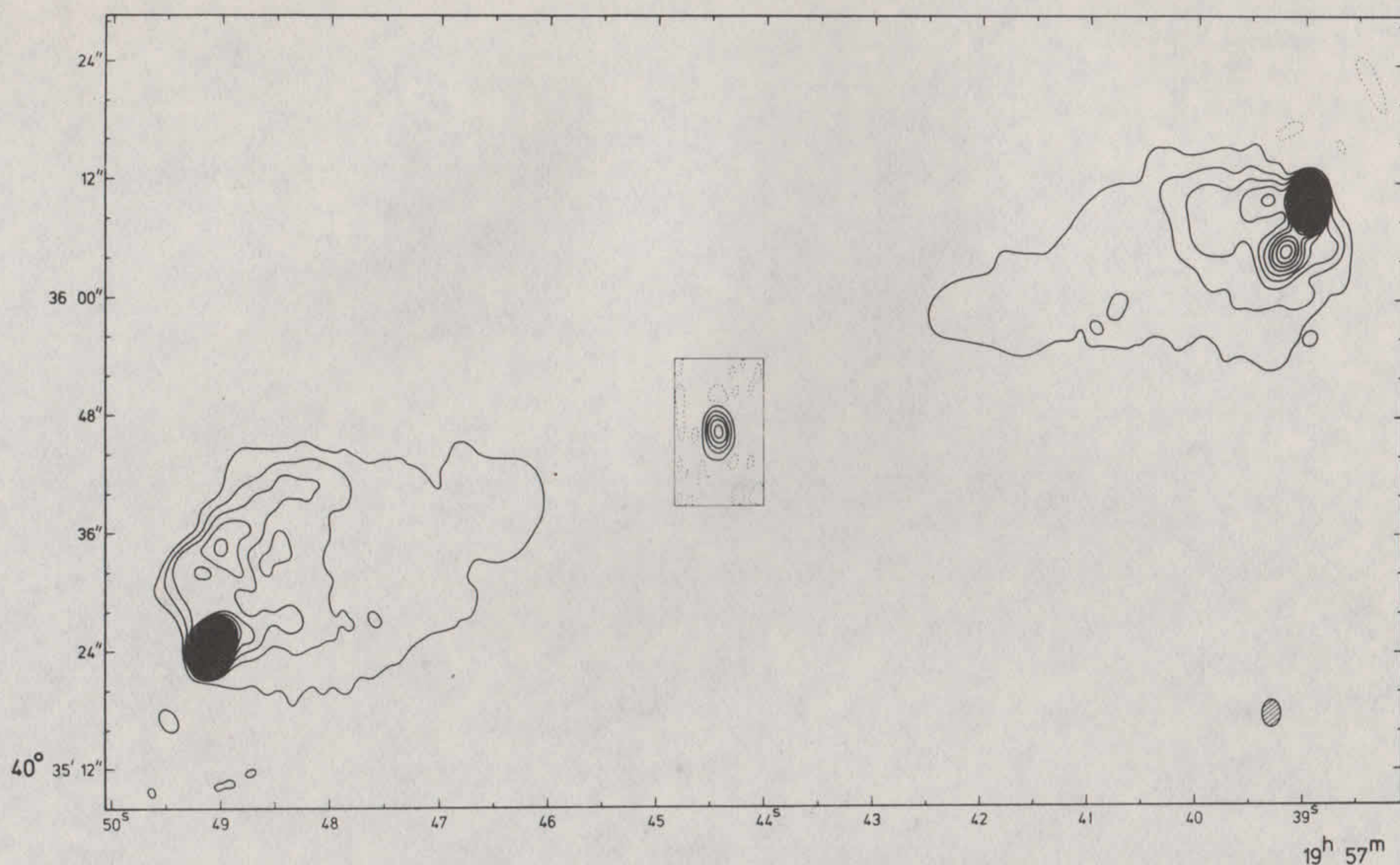
Se não podemos produzir uma singularidade nua a partir de um buraco negro existente, poderíamos produzir uma diretamente a partir do colapso de uma massa contendo mais do que a quantidade crítica de carga ou de momento angular? Novamente a resposta parece ser "não" Em tal situação o efeito da carga, ou da rotação, deveria ser suficiente para evitar a formação do buraco negro em primeiro lugar. No caso da rotação muito rápida, por exemplo, poderíamos dizer que a "força centrífuga" gerada pela matéria em colapso evitaria o colapso completo.

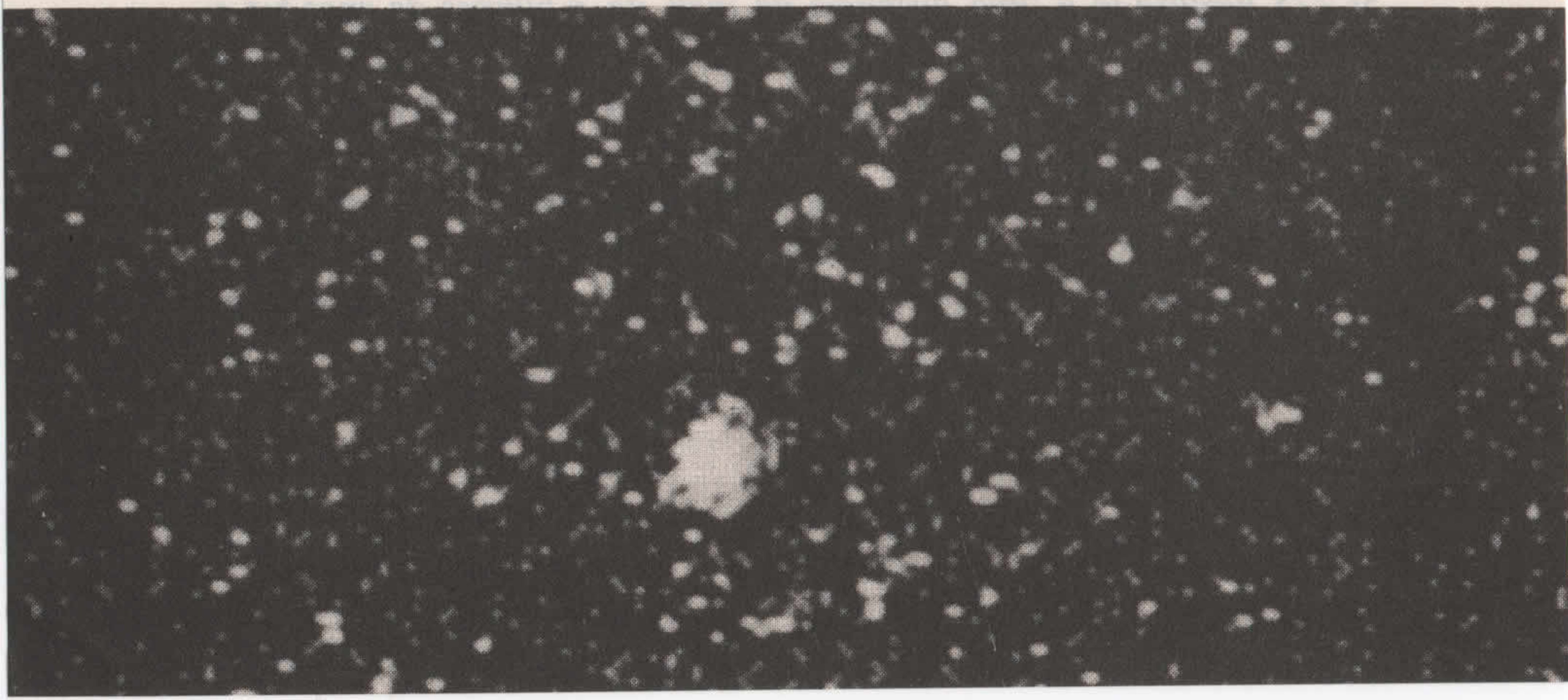
Nada disto é absolutamente certo, mas parece improvável que encontremos singularidades nuas associadas a colapso gravitacional e buracos negros. Existiriam outras possibilidades?

Buracos brancos

A RELATIVIDADE GERAL é uma teoria *temporalmente simétrica*. Funciona igualmente bem esteja o tempo fluindo para a frente ou para trás; existem soluções que se aplicam se o tempo correr na direção oposta à qual nós normalmente imaginamos que ele "flua".*

Nada existe de fora do comum a este respeito. O mesmo ocorre em relação à gravitação newtoniana. Consideramos um cometa movendo-se ao redor do Sol ao longo de uma órbita elíptica. Se a direção do tempo fosse invertida, o cometa ainda seguiria a mesma trajetória elíptica: sua direção seria invertida, mas sob todos os aspectos seu comportamento seria como antes – ele aceleraria à medida que se aproximasse do Sol e desaceleraria quando se afastasse. Ou, mais uma vez,

* A própria idéia da "fluência" do tempo é suspeita, mas constitui um fato inegável que a nossa impressão é que o tempo flui continuamente em uma só direção.

Radiomapa de Cisne A mostrando as duas principais regiões emissoras de rádio localizadas simetricamente dos lados opostos da galáxia central a qual ela mesma, é uma emissora de rádio relativamente fraca (contida dentro do retângulo). Os dois radiolobos, separados um do outro por cerca de 600.000 anos-luz, são considerados nuvens de material ejetado da galáxia central. (Cortesia do Observatório Radioastronômico Mullard, Cambridge.)

O quasar 0420-388. A fotografia em raios X obtida pelo Observatório Einstein, mostrando um dos mais distantes quasares emissores de raios X; com um desvio para o vermelho de 3,1, sua distância pode ser tão grande quanto 15 bilhões de anos-luz. (Cortesia de H. Tananbaum, Divisão de Astrofísica de Alta Energia, Centro Harvard/Smithsoniano de Astrofísica.)

O quasar 3C273. O primeiro quasar a ser identificado, em 1963, o 3C273 localiza-se a uma distância de mais de 3 bilhões de anos-luz e tem a aparência aproximada de uma estrela. É uma dupla fonte de rádio, a mais forte das fontes coincidindo com o "jato" e apresentada nesta fotografia em negativo pelo oval branco; a fonte mais fraca coincide com o centro do objeto parecido com uma estrela. Embora os quasares sejam muito pequenos em escala astronômica, irradiam centenas de vezes mais energia do que as galáxias ordinárias. (Fotografia dos Observatórios Hale.)

uma bola saltante ideal ainda cairia ao chão e voltaria a sua mão se o tempo estivesse correndo para trás.

Uma vez que a Relatividade Geral é temporalmente simétrica e que um buraco negro venha a existir quando uma nuvem de matéria cai até formar uma singularidade circundada por um horizonte dos eventos, o qual então continua a existir para sempre (ignorando os efeitos quânticos, que serão discutidos em capítulos posteriores), poderia existir o inverso temporal de um buraco negro, isto é, o processo de colapso com a ordem dos eventos invertida? Se tal entidade existisse, seria uma região do espaço fora da qual a matéria subitamente começaria a ser expelida, um *buraco branco.* Ele conteria uma singularidade que existira desde o começo do tempo mas da qual, em um momento aleatório e imprevisível, a matéria começaria a jorrar. Na verdade, tal como as partículas podem cair em um buraco negro após sua formação, presumivelmente, as partículas poderiam emergir em um buraco branco antes que o buraco fosse consumido em uma nuvem de matéria. Tais partículas de radiação poderiam emergir da singularidade central de um buraco branco e esta constituiria uma singularidade nua.

A possível existência de buracos brancos vem sendo debatida há algum tempo. Vários autores sugeriam que os buracos brancos podem localizar-se no centro das "galáxias em explosão" e que outros fenômenos energéticos como os quasares podem representar regiões onde a matéria está jorrando em nosso Universo. E este conceito proporcionou uma tentadora solução potencial para o comportamento de alguns destes objetos enigmáticos. O astrônomo soviético I. D. Novikov sugeriu em 1964 que os buracos negros poderiam ter surgido em conseqüência de eventos que tiveram lugar na grande explosão quando, como a teoria atual sugere, o Universo emergiu a partir de uma configuração infinitamente tensa – singularidade inicial. Argumentou que se algumas regiões da grande explosão inicial não participassem imediatamente da expansão global, estas regiões, ou "lagging cores", poderiam manifestar-se em uma etapa posterior como buracos brancos.

Se dermos uma olhada no diagrama de Penrose para um buraco negro giratório (Fig. 35) isto sugere outra possibilidade, isto é, se existem outros Universos, o colapso de matéria dentro de um buraco negro em um Universo passado poderia resultar em sua emergência como um buraco branco em nosso Universo. Em outras palavras, uma estrela em colapso "em algum lugar" tornar-se-ia nosso buraco branco. Devemos admitir que existe um atraente censo de simetria envolvendo a idéia de

buracos negros e brancos e a possibilidade de existir uma variedade infindável de Universos nos quais não temos contato no curso normal dos acontecimentos a não ser através dos buracos negros e brancos.

Na verdade, tais buracos podem não ser as únicas possibilidades. "Buracos cinzentos", constituídos de matéria que, tendo sido expelida de um horizonte dos eventos, quase imediatamente entra em colapso de novo, também foram cogitados.

Podem realmente existir os buracos brancos (ou cinzentos)? Já vimos que as opiniões a respeito do conceito de pontes no espaço-tempo nos buracos negros giratórios ou carregados concordam que o mesmo é demasiado idealizado e que tais pontes não existiriam na prática. Em vez disso, todos os buracos negros provavelmente contêm singularidades espaciformes nas quais a matéria cairia. Tais considerações militam contra a existência de buracos brancos surgidos de estrelas que entraram em colapso em outros universos (ou em diferentes regiões do espaço-tempo).

As possibilidades de "núcleos estanques" também não parecem ser muito brilhantes. Como D. M. Eardley argumentou em 1974, como a radiação próxima a um buraco negro é fortemente desviada para o vermelho, a radiação na vizinhança de um buraco branco deveria ser fortemente desviada para o azul; nos primeiros instantes do Universo, quando a matéria e a radiação se achavam densamente concentradas, uma tremenda produção de radiação fortemente desviada para o azul e altamente energética ocorreria ao redor do limite do potencial buraco branco. Assim sendo, muita massa-energia estaria concentrada em um pequeno volume de tal forma que um buraco negro se formaria ao redor do incipiente buraco branco, isolando-o do resto do Universo, antes que ele tivesse tempo de se desenvolver. Segundo K. Lake, da Universidade de Toronto, a única maneira pela qual um núcleo estanque poderia tornar-se um buraco branco "de verdade" seria se começasse a se expandir imediatamente após a Grande Explosão.

Lake sugere três possibilidades: que alguns buracos brancos podem ter entrado novamente em colapso para formar buracos negros; que alguns podem se ter expandido muito além de seus raios de Schwarzschild e serem irreconhecíveis hoje; e que poderia haver faltas de homogeneidade locais no momento da Grande Explosão que não se expandiram além de seus raios de Schwarzschild e que sempre foram visíveis. A radiação pode escapar de um buraco branco, mas os cálculos de Lake indicam que a radiação de um buraco branco deste último tipo

seria muito fortemente desviada para vermelho de tal forma que a fonte apareceria como um ponto vermelho muito intenso ao invés de algo dramático e espetacular.

Hawking argumentou que, se existem buracos brancos, eles serão indistinguíveis dos buracos negros; outros, como Penrose, afirmaram que não podem existir buracos brancos de modo algum. Por um lado, eles contrariam o princípio de censura cósmica, porque a singularidade é, em princípio, visível; mas deve ser reconhecido que a censura cósmica não é uma lei da natureza estabelecida mas simplesmente um princípio que torna a vida mais fácil para os físicos e que parece aplicável a grande variedade de situações. Penrose também argumentou, de maneira interessante, que a única razão pela qual os buracos brancos foram levados em conta consistiu em preservar a noção da simetria temporal (isto é, que leis fundamentais da natureza se aplicam igualmente bem quando o tempo corre em direção contrária). Como isto é manifestamente irreal no tocante a fenômenos em grande escala no Universo (todos os fenômenos em grande escala desde a evolução da vida até o comportamento do próprio Universo), não existe qualquer *necessidade* de invocá-lo para produzir tais entidades "indesejáveis" tais como os buracos brancos.

Embora ainda haja campo para debate, parece que ou os buracos brancos não existem mesmo ou, se existem, devem ser imperceptíveis e insignificantes na melhor das hipóteses, ou indistinguíveis dos buracos negros na pior delas. Parece bastante improvável que eles possam existir como os espetaculares jorros de matéria e energia necessários para explicar as entidades bizarras e altamente luminosas como os quasares ou – como alguns sugeriram – certos tipos de supernovas.

Se grande parte deste capítulo parece ter consistido em formular hipóteses e em seguida colocá-las abaixo, isto representa um reflexo da maneira pela qual a opinião das pessoas tem variado nos últimos anos. Quanto à existência dos buracos negros, entretanto, não existe a menor dúvida. Sua existência é uma conseqüência natural da melhor teoria gravitacional hoje existente – a Relatividade Geral – e da maior parte das teorias rivais. Mesmo a gravitação newtoniana conduz à possibilidade de objetos do tipo buraco negro. A teoria da evolução estelar não oferece qualquer alternativa tangível para o catastrófico colapso gravitacional de uma estrela que, no final de sua vida, possui demasiada massa para se tornar uma anã branca ou uma estrela-nêutron. Mesmo se algumas das forças ainda desconhecidas evitem a etapa final do colapso em uma sin-

gularidade infinitesimalmente pequena, isto não afetaria a formação de um horizonte dos eventos e a geração dessa região do espaço que denominamos buraco negro. Como vimos, um buraco negro pode ser formado a partir de matéria em densidade surpreendentemente baixa, se a mesma estiver disponível em quantidade suficiente.

Isto parece ser ponto pacífico.

9
Até que ponto o negro é negro?

ATÉ O INÍCIO dos anos 70 nosso conceito de buraco negro era bastante claro. Por definição, um simples buraco negro de Schwarzschild era uma região do espaço da qual nada, nem mesmo a luz, poderia escapar. Absorvendo tudo o que estivesse ao seu alcance e nada emitindo, sob todos os aspectos ele preenchia a definição de profundo negror. Supostamente, o material que ultrapassava o horizonte dos eventos de um buraco negro podia emitir substanciais quantidades de energia antes de, final e irrevogavelmente, desaparecer de vista, mas para um buraco negro existir nas profundezas do espaço, isoladamente de qualquer matéria, nada deveria emitir e seria completamente invisível.

A teoria "clássica" sugere que uma vez que um buraco negro se tenha formado continua a existir para sempre ou pelo menos até o fim do Universo. Um buraco negro não poderia tornar-se menor e não poderia perder massa. Embora um buraco negro giratório pudesse perder sua rotação após certo período de tempo e um buraco carregado pudesse perder sua carga, em ambos os casos o resultado final seria um buraco de Schwarzschild, não giratório, que sobreviveria pelo resto da eternidade. Um buraco negro não poderia encolher; ele só poderia aumentar. À medida que o tempo passasse um buraco negro poderia absorver matéria e radiação que se aproximasse suficientemente do seu horizonte dos eventos: isto aumentaria sua massa e, uma vez que o raio de um buraco negro é proporcional a sua massa, ele aumentaria de tamanho. Um buraco negro era encarado como um poço sem fundo com um insaciável apetite de massa-energia.

O teorema da área de S. W. Hawking (veja Capítulo 8) relacionava-se com este aspecto do buraco negro. A área do horizonte dos eventos não podia diminuir: se a matéria ou radiação caíssem em um buraco negro, a área de seu horizonte dos eventos aumentaria, e se dois buracos negros coalescessem, a área do horizonte dos eventos resultante seria maior ou igual à superfície combinada dos buracos originais. Este comportamento dos horizontes dos eventos é análogo ao comportamento de uma quantidade conhecida como entropia, utilizada em termodinâmica, uma ciência que pode ser descrita, em duas palavras, como a "ciência do calor"; mais corretamente, é considerada a ciência do comportamento da energia e da informação dos sistemas físicos – calor, afinal de contas, é uma forma de energia.

A famosa segunda lei da termodinâmica afirma que a entropia de um sistema fechado não pode diminuir; em qualquer processo que tenha lugar, deve aumentar ou permanecer igual. Por entropia entendemos a "inutilidade" da energia – o fato de que a energia pode não se achar disponível em uma forma conveniente para realizar trabalho útil; alternativamente, podemos encarar a entropia de um sistema como a medida da desordem desse sistema, da nossa falta de informação de seu estado preciso. Caso a entropia aumente, a quantidade de energia disponível para realizar trabalho útil diminui ou a quantidade de informação que possuímos a respeito do estado interno de um sistema diminui. A segunda lei é uma afirmação pessimista: essencialmente, afirma que, no Universo como um todo, as coisas só podem piorar!

Exemplificando, se temos um balde de água quente e um balde de água fria, podemos fazer uso da diferença de temperatura entre eles para movimentar uma máquina que realizará o trabalho útil. Se colocarmos os conteúdos dos dois baldes em um só recipiente eles se misturarão para atingir uma temperatura uniforme, da qual não podemos extrair trabalho útil. A água ainda contém energia (está quente), mas não podemos extrair trabalho para movimentar nossa máquina. Ou, se você preferir, comecemos com uma xícara de café preto e uma xícara de leite e coloquemos seus conteúdos em outra xícara, assim constituindo um café-com-leite marrom-claro. No estado inicial tínhamos certo grau de ordem e informação: o café estava em um recipiente e o leite em outro. Após a interação possuímos um sistema menos ordenado: o leite e o café estão misturados e não podemos localizar e separar um do outro. Perdemos a informação que possuíamos originalmente acerca da

localização do leite e da localização do café. Em ambos os exemplos, a entropia do sistema aumentou.

Em 1972 J. Beckenstein examinou a similaridade entre o comportamento da entropia e as propriedades dos horizontes dos eventos. Ambos os conceitos compartilham a característica de nunca diminuir mas tender a aumentar em qualquer processo em que estejam envolvidos. Poderia a analogia ser desenvolvida para proporcionar um elo significativo entre a física do buraco negro (gravitação) e a termodinâmica, duas ciências aparentemente díspares? Poderia um buraco negro possuir entropia e, assim sendo, o que significa a entropia de um buraco negro?

Sob certo aspecto um buraco negro possui realmente uma entropia bastante elevada. Um buraco negro só possui três características dignas de nota: massa, carga e momento angular. Por conseguinte um número quase ilimitado de configurações de partículas poderia ter contribuído para produzir buracos negros indiferenciáveis um do outro. Uma vasta quantidade de informação se perde na formação de um buraco negro. Beckenstein argumentou que a entropia de um buraco negro poderia ser descrita nos termos do número de possíveis estados internos que correspondem ao mesmo aspecto externo. Quanto mais massa possua o buraco, maior o número de possíveis configurações que contribuíram para a sua formação e maior a perda de informação. A área do horizonte dos eventos está relacionada com a massa do buraco negro (de fato, é proporcional ao quadrado da massa): quanto mais massa possui o buraco maior é a sua entropia, e quanto mais massa ele tem maior a área do seu horizonte dos eventos; por isso parece razoável encarar a entropia de um buraco negro como proporcional à área do seu horizonte dos eventos.

O problema que surge ao atribuir um valor finito de entropia a um buraco negro é que isto implica que um *buraco negro deva ter uma temperatura finita*. Para que um buraco negro tenha uma temperatura ele teria de emitir energia, uma idéia inteiramente oposta ao conceito básico de buraco negro. A analogia foi desenvolvida posteriormente, em 1973, por J. Bardden, B. Carter e S. W. Hawking, os quais demonstraram que a gravidade superficial de um buraco desempenhava um papel análogo ao conceito de temperatura em termodinâmica. A gravidade superficial ao nível dos horizontes dos eventos de um buraco negro é inversamente proporcional a sua massa e, se levarmos adiante a analogia, isto implica também que a temperatura de um buraco negro é

inversamente proporcional a sua massa, isto é, quanto menos massa possua o buraco, mais "quente" ele será.

Em torno dessa época S. W. Hawking estava investigando o comportamento quântico da matéria nas vizinhanças de um buraco negro. Para sua própria considerável surpresa e para a surpresa da comunidade científica quando ele publicou seus resultados em 1974, descobriu que os buracos negros pareciam emitir partículas tais como fótons, elétrons e neutrinos e que para um observador distante esta radiação teria um espectro térmico, isto é, a mesma espécie de espectro que se esperaria receber de um corpo quente ideal (um emissor de radiação conhecido, noção um tanto confusa, como corpo negro). As pesquisas de Hawking a respeito dos efeitos quânticos demonstraram que os buracos negros se comportavam como se tivessem temperatura e este comportamento preenchia exatamente as analogias que haviam sido feitas entre a física do buraco negro e a termodinâmica. Os buracos demonstraram emitir radiação do mesmo tipo que qualquer corpo quente e possuir temperaturas inversamente proporcionais às suas massas. Esta notável descoberta demonstrou que os buracos negros não eram completamente negros afinal de contas e abriu o caminho para o estabelecimento de elos entre a gravitação – que ainda permanecia isolada, aparentemente sem relação com as outras forças –, a termodinâmica e a teoria quântica.

Como pode um buraco negro emitir radiação se nada pode cruzar seu horizonte dos eventos sem ultrapassar a velocidade da luz, assim violando um dos dogmas da física moderna? A resposta reside na natureza da mecânica quântica. A teoria quântica implica que não podemos fazer afirmações precisas a respeito, por exemplo, das posições e dos movimentos de partículas; só podemos determinar as probabilidades de encontrar partículas em determinados lugares e com determinadas velocidades. A base desta asserção acha-se no princípio da incerteza, que já examinamos no Capítulo 4.

De acordo com o princípio da incerteza, não podemos determinar a *precisa* energia de uma partícula de um sistema físico em um intervalo de tempo arbitrariamente curto. Durante um período mais longo podemos fazer afirmações muito precisas acerca dela, mas quanto mais curto o intervalo de tempo menos preciso será nosso conhecimento. A grandeza que relaciona a incerteza em termos de energia com a incerteza em termos de tempo é a constante de Planck.

Combinando o princípio da incerteza com a equivalência entre massa e energia, estabelecida por Einstein ($E = mc^2$) verificamos que no

espaço ordinariamente "vazio", pares partícula-antipartícula (isto é, uma partícula de matéria e uma partícula de antimatéria) podem existir de forma muito breve antes de se chocarem de novo e se destruírem reciprocamente. Dentro de uma pequena região do espaço, em um microscópico intervalo de tempo, existe incerteza quanto à quantidade de energia que existe. Conseqüentemente, uma certa quantidade de energia pode existir por um breve instante; de acordo com o princípio da incerteza, quanto mais curto o intervalo de tempo maior a quantidade de energia que pode existir. Se a quantidade de energia é suficientemente grande ela pode assumir a forma de (isto é, "criar") uma partícula e sua antipartícula, ambas as quais podem existir durante um breve instante antes de se aniquilarem mutuamente. Desde que o aniquilamento tem lugar dentro do diminuto período de tempo permitido pela relação de incerteza, o processo é permitido pelas leis da natureza. Quanto mais alta é a energia associada a tais partículas, mais curto o instante durante o qual sua existência é permitida.

Tais partículas são conhecidas como partículas *virtuais* porque não podem ser observadas diretamente; entretanto, produzem efeitos indiretos que podem ser e têm sido medidos. Esta visão do espaço vazio está agora bem estabelecida: em vez de constituir um vácuo vazio e desinteressante, o espaço constitui uma densa sopa de partículas voadoras que se materializam e se aniquilam de tal maneira que o conteúdo básico de matéria-energia do Universo permanece constante.

O poderoso campo gravitacional próximo a um buraco negro intensifica o processo da produção de pares. Normalmente esperaríamos que estes pares se aniquilassem mutuamente quase instantaneamente de tal forma que não houvesse nenhuma criação de partículas. Entretanto, as imensas tensões gravitacionais perto do horizonte dos eventos poderia ter o efeito de separar uma partícula recém-criada de sua antipartícula (Fig. 36). Em alguns casos, a partícula e a antipartícula mergulhariam ambas no buraco negro, mas em outros casos somente um dos membros do par cairia nele, deixando o outro sem companheiro com o qual colidir e se aniquilar. Certa proporção destas partículas isoladas escaparia da vizinhança do buraco para atingir observadores distantes, dando a impressão de um fluxo de partículas emanadas do buraco. Esta é uma das maneiras de encarar a situação, mas o mecanismo exato pelo qual as partículas são emitidas não se conhece.

Qualquer que seja a natureza exata do processo, seu efeito consiste em extrair massa-energia do buraco de tal forma como se partículas

Aniquilamento
Criação
Partícula
Antipartícula
Espaço vazio (a)
BURACO NEGRO
Horizonte dos eventos
Escapa
Partícula
Antipartícula
(b)

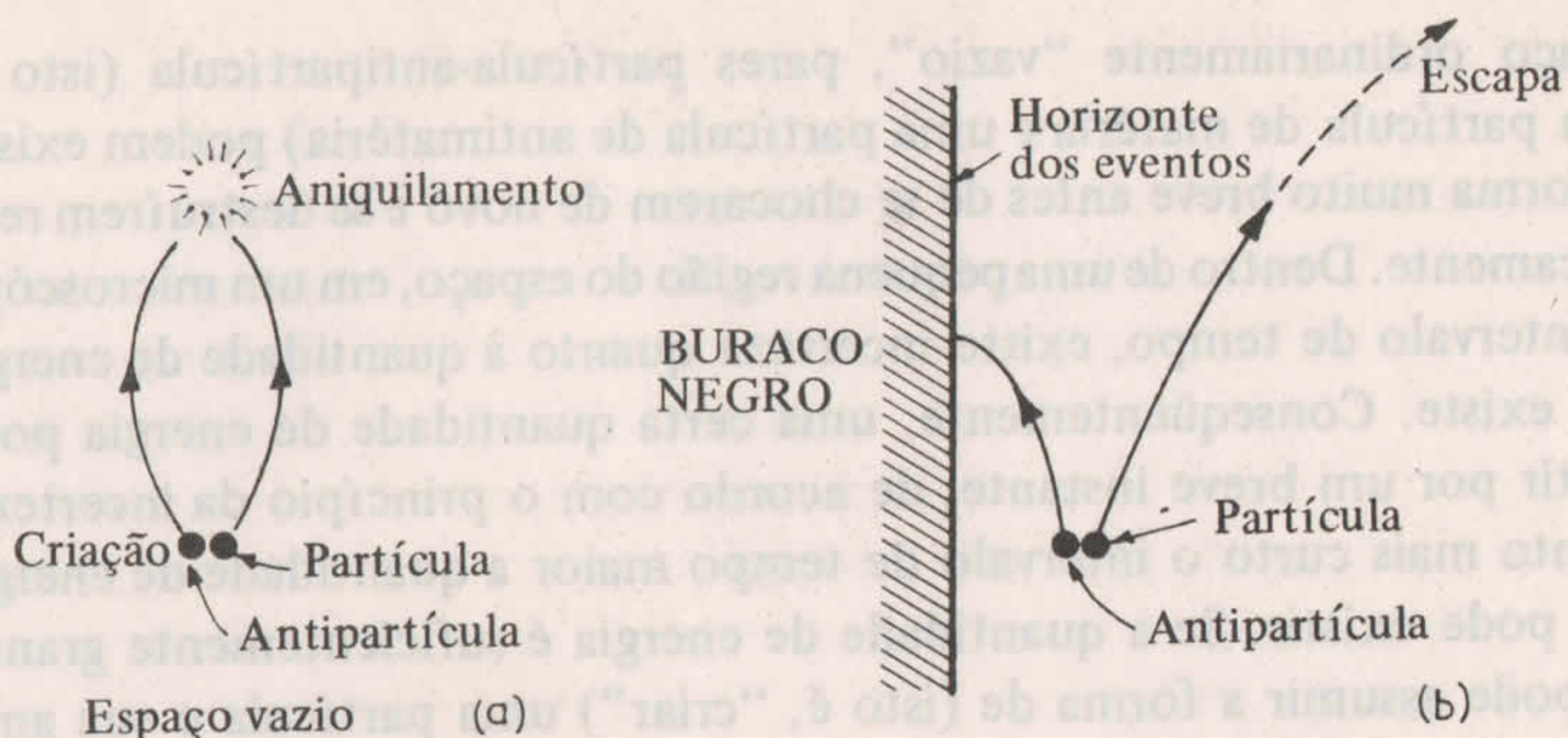



Fig. 36 Criação de partículas próximo dos buracos negros – processo de Hawking. *No chamado espaço "vazio" (*a*) pares de partículas e antipartículas estão sendo criados e, quase imediatamente, aniquilam-se mutuamente. Foi sugerido que próximo ao horizonte dos eventos de um buraco negro (*b*) as forças gravitacionais podem ser suficientemente fortes para separar o par recém-criado de partículas de tal forma que elas não possam se encontrar novamente e se aniquilarem mutuamente. Em alguns casos a partícula (ou antipartícula) pode escapar para o infinito, enquanto a antipartícula (ou partícula) cai no buraco. Para um observador distante pareceria que as partículas estão sendo emitidas pelo buraco.*

estivessem escapando de dentro dele – abrindo um túnel para fora de alguma forma. O fenômeno de abertura de um túnel é familiar em muitos aspectos da física quântica. As partículas que se defrontam com uma barreira que de acordo com as leis da física clássica não seriam capazes de atravessar, possuem não obstante uma probabilidade finita de passar para outro lado tal como se tivessem cavado um túnel através de tal barreira. Esta probabilidade pode ser calculada de acordo com os princípios da mecânica quântica.

Podemos considerar que as partículas emitidas por um buraco negro estabeleceram um túnel através do horizonte dos eventos com base nos princípios da mecânica quântica, assim reduzindo a massa do buraco. A probabilidade de escape de uma partícula depende da "espessura" na barreira através da qual ela tem de passar e isto, por sua vez, depende da massa do buraco. Quanto mais massa possui o buraco mais espessa a barreira e menos chance existe das partículas atravessarem. O índice de emissão de partículas é inversamente proporcional à massa do

buraco, de tal forma que as partículas podem escapar mais prontamente de um pequeno buraco do que de um grande.*

Tal como qualquer outro "corpo negro", o índice de emissão de energia (o débito energético) de um buraco negro depende da área superficial do buraco e da quarta potência da temperatura. A área superficial do horizonte dos eventos é proporcional ao quadrado da massa enquanto a temperatura de um buraco negro é inversamente proporcional à massa; reunindo estes dois fatores verificamos que o débito energético de um buraco negro é inversamente proporcional ao quadrado da massa. O débito energético corresponde à velocidade com que o buraco negro está perdendo massa; assim sendo, quanto mais massa possuir o buraco, mais lenta é a velocidade com que a massa se perde.

Um buraco negro portador de uma massa comparável à do Sol teria uma temperatura de cerca de um décimo milionésimo de um grau acima do zero absoluto de temperatura, demasiadamente baixa para possuir uma capacidade de radiação significativa ou detectável. Existe mais do que suficiente matéria e energia flutuando livremente no Universo hoje em dia para que a massa do buraco negro, à medida que a matéria e a energia caem nele, aumentar mais depressa do que o processo de Hawking a diminui. Mesmo supondo que nada mais caia nele, ainda seriam necessários cerca de 10^{66} anos para um buraco negro de massa solar evaporar-se completamente. Uma vez que este período é cerca de 10^{56} vezes maior do que a idade atualmente estimada do Universo, é claro que a radiação de um buraco negro não pode ter tido qualquer efeito remotamente significativo sobre os buracos negros de massa estelar desde a Grande Explosão. Uma vez que o tempo necessário para um buraco negro evaporar-se completamente depende do cubo de sua massa, um buraco negro de 10 massas solares sobreviveria mil vezes mais do que um buraco negro de massa solar!

Seria o processo de Hawking, então, de interesse puramente acadêmico? Talvez não. Se os buracos negros com massas muito baixas existem, eles possuiriam temperaturas muito mais elevadas e se evaporariam em escalas de tempo muito menores. Como Hawking demonstrou em 1951, as flutuações de densidade pouco depois da Grande

* A criação de pares de partículas pelo campo gravitacional próximo a um buraco negro *giratório* foi sugerida em 1970 pelo físico soviético Ya. B. Zel'dovich, mas considerou-se que o processo cessaria quando o momento angular do buraco desaparecesse. Hawking demonstrou que mesmo um buraco não giratório emitiria partículas.

Explosão poderiam ter produzido bolsões de matéria relativamente pequenos para formar miniburacos negros de pequena massa e tamanho microscópico. Tais buracos são conhecidos como buracos negros primordiais. As pressões necessárias para gerar buracos negros a partir de pequenas quantidades de matéria não podem ser produzidas no Universo de hoje, mas nos primeiros instantes de tempo é bastante admissível que isto possa ter ocorrido. Um buraco negro primordial contendo a massa de uma pequena montanha (digamos um bilhão de toneladas ou 10^{12} kg) seria comparável, em tamanho, a um próton e a densidade a qual essa matéria teria de ser comprimida para gerar um buraco negro deveria ser equivalente à densidade obtida se todas as galáxias no Universo observável fossem comprimidas em uma esfera com cerca de 10 *cm* de raio!

Um buraco negro primordial com esta massa teria uma temperatura de cerca de 10^{11} graus Kelvin. Emitiria elétrons, pósitrons, fótons, neutrinos e outras espécies de partículas com um débito energético de cerca de 6.000 megawatts. Este débito energético seria equivalente ao de várias grandes usinas de força terrestres.

À medida que um buraco negro perde massa, sua temperatura aumenta. Quanto mais quente ele se torna mais ele irradia, e quanto mais irradia mais depressa perde massa. À medida que a massa do buraco se torna muito pequena o processo sofre uma aceleração muito rápida até que, finalmente, o buraco irradia o restante de sua massa-energia em uma explosão catastrófica. Buracos negros primordiais de massa extremamente pequena teriam explodido logo depois de sua formação, mas buracos negros com cerca de um bilhão de toneladas levariam cerca de 10^{10} anos, um período de tempo correspondente à idade do nosso Universo. Alguns buracos negros primordiais deveriam estar explodindo agora.

Em nosso presente estado de conhecimento é impossível prever precisamente o que ocorreria nas etapas finais de evaporação do buraco negro; mas é certo que a explosão final resultaria na liberação de um tremendo surto de raios gama de alta energia. A previsão da *quantidade* de energia liberada depende da teoria das partículas elementares adotada para fazer os cálculos. De acordo com uma das mais "simples" teorias correntes (se é que tal termo pode ser aplicado a qualquer teoria das chamadas partículas "fundamentais"), que sugere que todas as partículas nucleares possuidoras de massa são constituídas de seis partículas básicas chamadas *quarks*, a energia liberada por um buraco negro

primordial explodindo agora, durante o segundo final de sua existência, é cerca de 10^{22} joules. Esta grandeza é comparável à explosiva violência de cerca de 10 milhões de bombas de hidrogênio de 1 megaton. Adotando uma teoria alternativa, devida a R. Hagedorn, a qual prevê a existência de uma ilimitada variedade de espécies de partículas elementares, a explosão resultante seria cerca de 100 mil vezes mais violenta – equivalente a um trilhão de bombas de hidrogênio!

É claro que se alguém pretende usar os buracos negros primordiais como uma fonte de energia, teria de ter muito cuidado para levá-lo para bem longe antes do momento da explosão final. Um buraco negro primordial, ao explodir, constituiria, alternativamente, uma devastadora arma de destruição. Mesmo o miniburaco com uma longa vida pela frente constituiria uma entidade bastante ameaçadora, irradiando milhares de megawatts de raios gama de alta energia que contaminariam todas as criaturas vivas da vizinhança.

O que restaria após a explosão? Não possuímos uma teoria capaz de explicar o que acontece quando um buraco negro se contrai abaixo do raio de Planck (cerca de 10^{-35}m), por isso esta questão reside em uma área de dúvida e especulação. O buraco negro pode desaparecer completamente, nada deixando a não ser a energia liberada em sua explosão final. A evaporação pode deixar para trás um buraco negro desprovido de irradiação com aproximadamente a massa de Planck (10^{-8}kg) ou – e esta é a possibilidade mais bizarra – talvez a emissão de energia possa continuar indefinidamente, deixando para trás uma singularidade nula de massa negativa. O consenso de opiniões favorece a primeira possibilidade, pela qual o buraco negro se evapora completamente, nada deixando para trás. Mesmo assim, no instante final da explosão o Universo exterior estaria exposto diretamente à singularidade localizada no núcleo do buraco em explosão. Um caso duvidoso para o censor cósmico!

A detecção de um buraco negro em explosão seria uma descoberta da maior importância. Não apenas demonstraria a validade da teoria de Hawking e as ligações entre a gravitação, a termodinâmica e a teoria quântica mas, uma vez que diferentes teorias da física das partículas fazem previsões extremamente diversas a respeito das propriedades de tais explosões, a análise das emissões energéticas proporcionaria informações fundamentais acerca da natureza das partículas fundamentais. Tendo dito isto, é bastante enfatizar que nenhuma dessas explosões já foi detectada e que mesmo que elas ocorram seria muito

difícil detectá-las. Não há certeza de que existam buracos negros primordiais; eles permanecem, no momento, como apenas uma possibilidade teórica.

A CIÊNCIA do final do século XIX deu grandes passos à frente e não havia qualquer idéia, então, de que houvessem limites fundamentais àquilo que podemos vir a conhecer. Existia a sensação de que, com diligência e paciência, qualquer quantidade poderia ser medida e o futuro comportamento do Universo e de seus componentes poderia ser previsto.

O advento da mecânica quântica mudou este estado de espírito. O princípio da incerteza afirma que não podemos simultaneamente conhecer a posição precisa e a velocidade precisa de uma partícula (quanto maior a precisão com a qual medimos uma dessas grandezas, menor a precisão com a qual poderemos avaliar a outra). A mecânica quântica implica que não podemos prever a evolução precisa de experiências envolvendo partículas isoladas; tudo que se pode fazer é calcular as probabilidades de diferentes evoluções. A medida de incerteza introduzida no Universo pela mecânica quântica não agradava a Einstein, que teria observado: "Deus não prega peças".

A emissão de partículas oriundas dos buracos negros introduz um grau maior de incerteza, uma vez que não podemos predizer nem a posição nem a velocidade de uma partícula emitida. Hawking argumenta que, sob certo aspecto, a radiação pode ser considerada como partida da singularidade, uma região onde o espaço-tempo tal como conhecemos não faz sentido. Igualmente, novas informações aleatórias estão penetrando no Universo a partir de regiões do espaço-tempo das quais não temos nenhum conhecimento e isto reduz ainda mais nossa capacidade de fazer previsões do futuro estado do Universo. Existe, então, o que foi denominado o *princípio da ignorância*. À observação de Einstein, Hawking teria replicado: "Deus não apenas prega peças, mas também, às vezes, as coloca onde não podem ser vistas".

Vivemos em um mundo de probabilidades e se as idéias de Hawking sobre os buracos negros e a mecânica quântica são corretas, existem os limites fundamentais para aquilo que não fomos capazes de conhecer ou de prever. Os buracos negros terão alterado toda a nossa filosofia da natureza.

10
Buracos negros no Universo

OS BURACOS negros podem surgir em uma grande variedade de contextos astrofísicos. Podemos encontrar buracos negros variando de duas ou três massas solares até cerca de 100 massas solares, formados a partir de estrelas que entraram em colapso; buracos negros com mais de alguns milhares de massas solares podem existir nos núcleos de aglomerados estelares globulares de grande massa; há quem afirme que buracos negros com massas gigantescas, variando de alguns milhões até alguns bilhões de massas solares podem residir nos núcleos das galáxias, particularmente nos núcleos hiperativos tais como as radiogaláxias e os enigmáticos quasares. No outro extremo da escala existe a possibilidade de que buracos negros primordiais, com massas pouco acima de um bilhão de toneladas, possam estar espalhados em quantidade imprevisível. Já foi sugerido que grandes quantidades de material invisível podem estar aprisionadas em buracos negros viajando através do espaço intergaláctico. Se de fato existe grande número de buracos negros, particularmente entre as galáxias, sua influência gravitacional conjunta poderia exercer um profundo efeito sobre a evolução do Universo, uma possibilidade mais bem explorada no próximo capítulo.

Os buracos negros vêm sendo invocados para "explicar" tal variedade de fenômenos astronômicos que existe o perigo de serem encarados como uma solução para todos os problemas não resolvidos na astrofísica. Casos convincentes do envolvimento dos buracos negros

podem ser apresentados em muitas circunstâncias, mas devemos levar em conta que, no momento, não existe qualquer prova *conclusiva* de que os buracos negros realmente existem.

Em busca dos buracos negros

NÃO DEVEMOS esperar que seja fácil encontrar buracos negros. Buracos negros isolados de massa estelar ou ainda maiores seriam realmente muito negros. Se acontecesse de uma espaçonave encontrar-se em uma rota de colisão com um buraco (uma situação bastante improvável) ela poderia mergulhar nele sem perceber a sua presença até que fosse tarde demais. Nem o radar nem o laser ajudariam coisa alguma, por razões óbvias.

Uma possível abordagem seria utilizar o efeito da lente gravitacional (Fig. 37). Como vimos no Capítulo 5, a luz é desviada ao passar próximo a um corpo de grande massa de uma forma muito semelhante como se desvia ao atravessar uma lente. A proporção do desvio do raio de luz depende da massa do corpo e da distância a que passa o raio. Os raios de luz podem ser concentrados em um foco por um buraco, e um observador localizado no foco teria uma imagem ampliada de um objeto distante localizado diretamente por trás do buraco. Na situação ideal de uma fonte puntiforme de luz e uma lente gravitacional de massa puntiforme (um buraco negro é bastante pequeno para ser considerado um ponto), a imagem também seria um ponto, tal como uma estrela vista através de um telescópio; se a fonte fosse extensa apareceria como um anel ou, se o alinhamento entre a fonte, a lente e o observador não fosse

Fig. 37 A lente gravitacional. *Os raios de luz que passam próximo a um corpo de grande massa (por exemplo, um buraco negro; mas qualquer corpo de grande massa atuaria como uma lente) serão desviados de tal forma que em um ponto determinado do lado oposto do corpo, a partir da fonte de luz, eles serão enfocados e uma imagem produzida. (Compare com a Fig. 24.)*

perfeito – isto é, se a "lente" estivesse fora do eixo – como dois crescentes.

Se buracos negros portadores de hipermassas – com mais de um trilhão (10^{12}) de massas solares – existem no Universo em número significativo, os efeitos da lente gravitacional seriam detectáveis na distribuição das galáxias no céu, particularmente entre os quasares e as radiogaláxias muito distantes. A ausência de acentuados efeitos desta natureza sugere que buracos negros nesta escala são muito pouco comuns, se é que realmente existem. Há hoje muitos indícios comprovando pelo menos um caso de imagem dupla envolvendo um quasar, mas considera-se que a lente, neste caso, é uma galáxia de grande massa localizada entre nós e o quasar: qualquer corpo de grande massa pode atuar como uma lente, mas quanto mais simétrico melhor a "qualidade óptica" da lente.

Foi até sugerido que os futuros astrônomos poderiam utilizar o Sol como uma lente gravitacional para estudar objetos distantes. Em 1979 o Dr. Von R. Eshleman, da Universidade de Stanford, propôs que um observatório estacionado a cerca de 50 vezes a distância de Plutão poderia localizar-se no ponto focal dos raios de luz de fontes distantes passando pela borda do Sol. Em princípio, gigantescas ampliações poderiam ser obtidas. Um outro aspecto da lente gravitacional seria sua capacidade de reunir e concentrar luz, assim tornando visível fontes débeis que, de outra forma, não poderiam ser detectadas. Talvez em um futuro não demasiadamente distante, a astronomia da lente gravitacional proporcionará novas "janelas" para o Universo ao nosso redor.

Entretanto, no momento ainda não fomos capazes de usar o efeito da lente gravitacional para localizar qualquer buraco negro. Existem quaisquer outras abordagens para o problema? As propriedades fundamentais dos buracos negros que poderiam nos auxiliar são as seguintes: possuem grande massa (exceto os miniburacos primordiais); são compactos; não emitem coisa alguma detectável a partir dos seus horizontes dos eventos (excetuando os miniburacos novamente) e assim não podem ser vistos diretamente; e, em virtude de seus poderosos campos gravitacionais, podem constituir poderosas fontes de energia. À luz destas propriedades, nossa melhor esperança de encontrar um buraco negro é permanecer atentos à influência que ele exerce sobre seus arredores e isto será muito mais evidente nas vizinhanças da matéria. Deve-

mos estar atentos para estes efeitos sobre, por exemplo, as órbitas das estrelas próximas e/ou para fontes de energia muito compactas e altamente energéticas.

Buracos negros de massa estelar

COMO PODEMOS tentar detectar buracos negros com massa superior a 100 massas solares?

Mais de metade das estrelas antigas em nossa galáxia acham-se localizadas em sistemas binários ou múltiplos e já vimos que alguns binários contêm anãs brancas ou estrelas-nêutrons: parece razoável supor que podemos encontrar binários contendo buracos negros. Se um membro de binário evoluir mais depressa do que o outro e terminar como um buraco negro estaríamos diante de uma estrela normal e um buraco negro invisível em órbita em torno do outro. Existem exemplos de estrelas que parecem orbitar sob influência de um companheiro invisível, mas este geralmente acaba por revelar-se uma anã branca ou uma estrela nêutron demasiado débil para ser vista em virtude do brilho da estrela normal.

Os binários, em sua maioria, são espectroscópicos (veja Capítulo 6), achando-se as estrelas envolvidas demasiadamente próximas para serem visualizadas individualmente; a presença de um companheiro invisível pode ser deduzida, em tais casos, a partir de mudanças periódicas nos comprimentos de ondas das linhas espectrais da estrela visível, que são indicativas do movimento periódico da estrela ao redor do centro de massa do sistema binário.

Como vimos no Capítulo 6, este movimento pode ser analisado para fornecer razoáveis estimativas das massas dos corpos envolvidos. Em um binário de linha única (onde a estrela companheira é demasiado débil para ser detectada) geralmente é possível fazer uma avaliação da massa da companheira com base no conhecimento das propriedades da estrela visível. A companheira invisível geralmente se revela uma estrela de pequena massa (que possui muito pouca luminosidade), uma anã branca ou uma estrela-nêutron, mas se acontecer de depararmos com um binário de linha única com uma companheira invisível de massa apreciavelmente maior do que o máximo permitido para uma estrela-nêutron, então podemos começar a suspeitar de que a companheira invi-

AP Librae. Um objeto BL Lacertae que, embora parecendo uma estrela, é conhecido como uma fonte intensa, compacta e variável localizada no centro de uma galáxia distante. Uma inspeção melhor deste objeto, localizado ao centro, próximo ao topo da fotografia, mostra que suas bordas são difusas devido à luz emitida pelas estrelas situadas nas porções internas da galáxia circundante. Tais como os quasares, os objetos BL Lacertae parecem ser objetos compactos e altamente energéticos localizados nos centros das galáxias e existem fortes indícios apoiando o ponto de vista de que sejam alimentados por buracos negros centrais de grande massa. (Fotografia obtida com a Unidade Telescópica Schmidt, do Reino Unido. Cortesia Photolabs, Observatório Real, Edimburgo.)

Galáxia de Seyfert NGC 4151, mostrando o núcleo brilhante e os braços em espiral relativamente apagados, típicos das galáxias deste tipo. Os astrônomos estão ansiosos para descobrir porque as galáxias de Seyfert possuem núcleos tão compactos, ativos e variáveis. (Fotografia do Observatório de Palomar, Instituto de Tecnologia da Califórnia.)

Radiofotografia da radiogaláxia 3C 449 que apresenta esta fonte como ela pareceria se o olho humano fosse sensível às ondas de rádio. A fonte central coincide com uma galáxia elíptica da qual, presumivelmente, os lobos radioemissores foram ejetados, achando-se o lobo maior de maior massa mais próximo da galáxia. Muitas radiogaláxias de lobo duplo apresentam uma fonte central que, com uma resolução muito mais alta, se mostram possuidoras de aparência semelhante, isto é, com dois lobos, em escala muito maior. Em tais casos parece que a ejeção do material ocorreu muito mais recentemente do que o evento que deu origem aos grandes lobos. É freqüente que os lobos em pequena escala se localizem ao longo do mesmo eixo que os lobos em grande escala. (Cortesia do Observatório Mullard de Radioastronomia, Cambridge).

Galáxia elíptica gigante M87 na constelação de Virgem. Esta fotografia de curta exposição mostra o jato que emana do núcleo central desta galáxia; ela é uma poderosa fonte de rádio e conhecida como Virgem A. Uma das galáxias de maior massa que se conhece, a M87, pode – de acordo com certos resultados recentes – conter um buraco negro de grande massa com cerca de 5 bilhões de massas solares. (Fotografia do Observatório Lick.)

sível é na verdade um buraco negro. Uma estrela ordinária, digamos, com 10 massas solares seria altamente luminosa e é difícil explicar uma companheira invisível de massa tão grande a não ser admitindo que se trate de um buraco negro. Entretanto, indícios desta espécie seriam bastante insuficientes para assegurar uma "convicção". O conceito de buraco negro é tão importante, fundamental e excitante que indícios de melhor qualidade seriam essenciais para constituir provas aceitáveis. Evidências corroborativas seriam essenciais.

Se a estrela e seu companheiro buraco negro estiverem suficientemente próximos, a estrela será distorcida pela atração gravitacional e teria lugar significativo fluxo de matéria da estrela em direção ao buraco. Como vimos no Capítulo 6, se uma estrela é bastante grande para ultrapassar seu lobo de Roche (Fig. 28), substanciais quantidades de matéria fluirão através do ponto interno de Lagrange para penetrar na órbita ao redor da companheira. Mesmo que a estrela não tenha preenchido inteiramente o lobo, um forte vento estelar conduzirá o material para fora da estrela e certa quantidade do mesmo será capturada pela companheira.

Se esta companheira é na verdade um buraco negro, o que acontece com a matéria capturada da estrela? O movimento orbital dos dois corpos ao redor um do outro assegurará que a matéria não cairá diretamente no buraco. Ao invés disso, entrará em órbita através do buraco, formando um disco de gás achatado conhecido como o *disco de acreção*, com o gás revolvendo a velocidades cada vez maiores quanto mais próximo do horizonte dos eventos. Ao nível da borda externa do disco de acreção o gás terá uma temperatura similar ao da superfície da estrela mas, um pouco mais para dentro, o atrito produzirá temperaturas altíssimas; nas porções internas do disco, podemos esperar que elas superem 100 milhões de graus. O campo gravitacional de um buraco negro é tão poderoso que a matéria que caia diretamente nele está viajando a uma grande fração da velocidade da luz no momento em que se aproxima do horizonte dos eventos. Desde que um buraco negro é muito pequeno, não é de surpreender que o material que nele penetre a estas velocidades se torne realmente muito quente.

A viscosidade no disco de acreção leva a matéria a escorregar em direção ao buraco porque, quando algumas partículas colidem, perdem momento angular e se aproximam mais. O material em órbita próximo ao buraco a uma grande fração da velocidade da luz finalmente espirala através do horizonte dos eventos e se perde de vista (a uma distância de

cerca de três raios de Schwarzschild não existem quaisquer órbitas estáveis ao redor de um buraco negro de Schwarzschild). Espera-se que o material que caia no disco libere copiosas quantidades de energia contribuindo talvez com 10 por cento da energia equivalente da matéria envolvida, isto é, cerca de 10 por cento de mc^2.

Existe um limite para quantidade de matéria que pode cair num buraco negro desta maneira porque, se a luminosidade gerada excede um valor crítico conhecido como o limite de Eddington, a pressão devida a esta radiação será suficiente para soprar para longe a maior parte da matéria que ali penetrou.

Candidatos a buraco negro

CISNE X-1 é uma poderosa fonte de raios X descoberta em 1970 pelo satélite da NASA *Uhuru*, que fez o primeiro levantamento completo do céu com raios X. No ano seguinte ficou demonstrado que Cisne X-1 coincide em posição com uma estrela supergigante, azul e quente, conhecida pelo número HDE 226868. As investigações levadas a termo por C. T. Bolton, do Observatório David Dunlap, mostraram que a HDE 226868 é um binário de linha única com período orbital de 5,6 dias. A estrela visível possui uma massa entre 20 e 30 massas solares e temperatura em torno de 25.000° Kelvin, tornando-a uma estrela altamente luminosa, facilmente visível na faixa de uns 8 mil anos-luz. Avaliações da massa da companheira invisível a colocaram entre 5 e 15 massas solares, mas investigações minuciosas a respeito da maneira com o débito luminoso da HDE 226868 varia – estas variações, devidas à distorção da estrela, foram estudadas pela primeira vez no início da década de 70 por V. M. Lyutiy – permitiram fixar melhor essa massa entre 8 e 11 massas solares. Tal valor é bastante excessivo no que se refere à massa máxima permitida para uma anã branca ou uma estrela-nêutron e a resposta pode ser perfeitamente a presença de um buraco negro.

A presença da emissão de raios X está de acordo com tal imagem, desde que sugere fortemente que Cisne X-1 contém um compacto disco de acreção a partir do qual os raios X observados provêm. Um ponto importante a respeito desta emissão é sua rápida variabilidade; a intensidade da radiação observada flutua de acordo com períodos que variam de milissegundos a meses ou mesmo anos. Desde que nenhuma informação pode ser comunicada mais depressa do que a velocidade da luz,

uma fonte de radiação não pode variar em termos de brilho global de uma quantidade significativa em um período de tempo menor do que o necessário para um raio de luz cruzar estas fontes. Uma flutuação em um período de milissegundo implicaria assim que a fonte responsável não pode ser menor do que cerca de 300 km de diâmetro.

O mecanismo preciso responsável pela emissão de radiação do disco de acreção pelas flutuações é obscuro – muito possivelmente existem vários mecanismos diferentes em ação. Entre as possibilidades em discussão achavam-se pontos quentes devidos a instabilidades no disco. Uma mancha quente orbitando em um milissegundo, por exemplo, estaria logo acima do horizonte dos eventos; muitas manchas quentes em órbita dariam origem a periodicidades caóticas e flutuações aparentemente aleatórias. Qualquer que seja o mecanismo, o que importa a respeito destas variações é a dimensão muito pequena da região emissora.

É verdade que se admite a presença de discos de acreção emissores de raios X onde existem estrelas-nêutrons em sistemas binários fechados e muitas das "estrelas" emissoras de raios X até agora detectadas podem ser explicadas desta maneira. Entretanto, parece que o espectro dos raios X e as variações de intensidade de Cisne X-1 diferem de forma acentuada do comportamento associado das estrelas-nêutrons acrescentes.

A possibilidade de Cisne X-1 conter um buraco negro repousa no seguinte indício: a presença de uma companheira invisível, aparentemente portadora de massa demasiada para ser anã branca ou uma estrela-nêutron; e a presença de um disco de acreção emissor de raios X, assim como a rápida variabilidade da emissão oriunda do mesmo. Teorias e alternativas foram propostas – alguém sugeriu, por exemplo, que se trata de um sistema triplo contendo uma estrela-nêutron acrescente orbitando uma das outras duas – mas tais alternativas parecem ser bastante discutíveis e não existe qualquer indício convincente do efeito periódico extra que seria esperado se três estrelas estivessem envolvidas. A solução mais simples e que melhor explica os dados disponíveis é que Cisne X-1 realmente contém um buraco negro e, 10 anos após sua descoberta, continua a ser o melhor candidato a buraco negro.

Teriam os antigos chineses observado o evento que levou a sua formação? Esta excitante possibilidade foi levantada em 1979 por Li Qui-bin, do Observatório de Pequim, quando assinalou que os registros chineses pareciam indicar que houve uma "estrela convidada" em outu-

bro de 1408 em uma posição que corresponde muito estreitamente à atual localização de Cisne X-1. Teria sido essa "estrela convidada" uma supernova associada com a formação do buraco negro de Cisne X-1? A posição do objeto registrado era tal que ele estaria quase a pino nos céus da Europa ao entardecer, mas não existe qualquer registro europeu deste evento. Certamente não passaria despercebido, se realmente isto tivesse acontecido? Existem consideráveis dúvidas, por isso, a respeito da validade dos registros chineses, mas devemos levar em conta que os europeus não parecem ter registrado a supernova do Caranguejo, em 1054.

O colapso final de uma estrela para formar um buraco negro pode ou não ser acompanhado por uma explosão do tipo supernova. A teoria é obscura a esse respeito. Recentes pesquisas realizadas pelo astrofísico soviético Iosef Shklovskii sugerem que um remanescente bem conhecido de uma supernova pode possuir um buraco negro central ao invés da estrela-nêutron central associada a objetos como a nebulosa do Caranguejo e da Vela. O objeto a que nos referimos é uma poderosa fonte de ondas de rádio conhecida como Cassiopéia A, uma das primeiras radiofontes a ser descoberta e a mais brilhante no céu sob longos comprimentos de onda. Mostrou ser uma concha de gás em expansão, implicando a alta velocidade de expansão que houve uma explosão de supernova. A partir das dimensões atualmente avaliadas da concha pode ser deduzido que a explosão deve ter ocorrido cerca de 300 anos atrás, na última parte do século XVII. Mesmo a sua distância de 9.000 anos-luz uma supernova normal deveria ter aparecido tão brilhante quanto as mais brilhantes estrelas no céu, e, levando em consideração que este foi um período de intensa atividade astronômica, seria surpreendente se a supernova passasse despercebida. De fato, supernovas foram registradas em 1572 (na Cassiopéia) e em 1604; se tivesse havido uma dessas estrelas visível na última parte do século XVII, quase certamente teria sido observada, particularmente se tivesse ocorrido em Cassiopéia, uma constelação bem conhecida, sendo visível na Europa Setentrional.

Shklovskii sugere que a ausência de uma estrela-nêutron central poderia implicar que o objeto que deu origem a Cassiopéia A foi uma estrela de grande massa cujo núcleo entrou em colapso para formar um buraco negro e argumenta que qualquer supernova associada a isto não teria brilho suficiente para ser observada. As observações realizadas pelo satélite HEAO-2 (o "Observatório Einstein", como veio a ser conhecido) com raios X não demonstraram qualquer indicação de uma estrela-

nêutron central, embora uma estrela-nêutron com apenas 300 anos de idade constituísse uma fonte de raios X facilmente detectável. Outro aspecto muito sugestivo é o fato do espectro da nuvem em expansão não revelar traços de elementos pesados como o ferro, o qual seria de esperar que existisse nos remanescentes de uma supernova (uma vez que em tais explosões grande parte do interior da estrela, onde são gerados os elementos pesados, é arremessada no espaço): esta ausência parece excluir a possibilidade da completa destruição da estrela. E se esta não foi completamente destruída e não se formou nenhuma estrela-nêutron, a única possibilidade lógica que resta é que a maior parte da estrela entrou em colapso em um buraco negro. É cedo demais para julgar a validade da sugestão, mas talvez seja digno de nota que o Observatório Einstein parece demonstrar uma surpreendente escassez de estrelas-nêutron emissoras de raios X nos remanescentes de supernova, fato esse que pode exigir uma revisão das nossas idéias a respeito de como as estrelas-nêutron se formam e esfriam.

EMBORA CISNE X-1 continue a ser o melhor candidato a buraco negro, existem outras fontes que não devem ser esquecidas. Provavelmente o próximo bom candidato é outra fonte de raios X, Circinus X-1 (conhecida também como 3U 1516-56, número sob o qual consta no Terceiro Catálogo Uhuru de fontes de raios X). Também está associada a um sistema binário e a emissão de raios X apresenta rápida variabilidade. Tal como Cisne X-1, Circinus X-1 foi estudada sob comprimentos de onda correspondentes aos raios X, ópticos, infravermelhos e ondas de rádio. Mais afastada do que Cisne X-1, localizada a uma distância de uns 25.000 anos-luz, a estrela visível é notavelmente obscurecida pelos efeitos da poeira interestelar e até agora não foi possível estabelecer as massas da estrela e da companheira invisível, as quais revolvem ao redor uma da outra em 16,6 dias. A similaridade de propriedades é notável, mas os indícios não são tão fortes quanto em Cisne X-1. É interessante observar que Circinus X-1 se localiza próximo a uma possível remanescente de supernova com cerca de 100.000 anos de idade.

Entre as várias outras possibilidades acha-se GX399-4 (4U 1658-48), a qual foi proposta como candidata em 1979 por um grupo baseado no Laboratório de Pesquisa Naval, em Washington, fundamentando-se em sua variabilidade de emissão de raios X. O componente óptico foi identificado, mas até o momento em que escrevíamos estas

linhas ainda não se dispunha de dados suficientes para demonstrar se havia ou não um sistema binário.

DESDE OS ÚLTIMOS meses de 1978 a comunidade astronômica ficou fascinada, perplexa e excitada por um objeto realmente estranho batizado como SS 433 (número 433 em um catálogo de estrelas produzidos por C. Stephenson e N. Sanduleak, da Case Western Reserve University, Ohio, sendo o aspecto característico destas estrelas as fortes linhas de emissão em seus espectros). A SS 433 é uma forte fonte de rádio, mostrando uma similar variabilidade de emissão no que se refere a Circinus X-1, e se localiza próximo ao centro de um remanescente de supernova conhecido como W50. Utilizando o Telescópio Anglo-Australiano, P. Murdin e D. Clark, do Observatório Real de Greenwich, identificaram independentemente uma fonte de rádio puntiforme que apareceu no levantamento de Molongolo-Parkes com uma estrela exibindo linhas de emissão de hidrogênio. Eles propuseram que estas linhas eram emitidas por gás fluindo para um objeto em colapso componente de um sistema binário no centro do remanescente da supernova. Esta fonte, que veio a ser a SS 433, também foi detectada como uma fonte de raios X pelo satélite britânico Ariel 5, lançado em 1974.

Então veio a mais extraordinária descoberta de todas. B. Margon, da Universidade da Califórnia, em Los Angeles, descobriu que contra um fundo de linhas de emissão estacionárias havia pares de linhas que se moviam de um lado para o outro, em termos de comprimento de onda, dentro de um período de 164 dias. Para explicar o desvio de um comprimento de onda dessas linhas pelo efeito Doppler era necessário admitir a existência de nuvem de matéria responsável por esta emissão, movendo-se a velocidades colossais: as velocidades radiais (isto é, movimentos em nossa direção e afastando-se de nós) eram nada menos do que um valor entre 30.000 e 50.000 km por segundo, isto é, entre um décimo e um sexto da velocidade da luz.

Que objeto devia ser aquele? M. Milgrom e sua equipe, em Israel, assim como R. J. Terlevich e J. E. Pringle em Cambridge (Inglaterra), foram alguns dos que propuseram modelos de buracos negros de grande massa admitindo que a radiação responsável pelas linhas de emissão móveis ser oriunda de matéria circulando em torno de um buraco entre algumas centenas de milhares e alguns milhões de massas solares. Se essa matéria estivesse circulando em um anel, um lado do anel seria observa-

do como se aproximando enquanto o outro estaria se afastando.

Partindo do trabalho de Margon e G. Abell, nos Estados Unidos, P. G. Martin e M. Rees na Inglaterra e outros, está emergindo uma imagem alternativa. As linhas móveis de emissão provavelmente se originam em dois jatos opostos de matéria movendo-se para fora de uma ponte central giratória com uma velocidade em torno de 80.000 km por segundo (cerca de 27% da velocidade da luz); como o eixo da fonte sofre uma precessão, tal como ocorre com um pião, os jatos periodicamente apontam mais ou menos diretamente para nós e em direção oposta (de fato, eles sempre apontam formando um ângulo com a linha de visão: veja Fig. 38). É o movimento desses jatos que acarreta os comprimentos de ondas variáveis das linhas de emissão. Existe aqui um paralelo com o comportamento de um binário espectroscópico mas, naturalmente, as velocidades envolvidas são provavelmente maiores.

De onde provêm os jatos de matéria? Observações espectroscópicas mostram que as linhas de emissão "fixas" sofrem um pequeno desvio periódico de comprimento de onda sugerindo que o SS 433 é um binário com um período orbital de 13 dias, contendo uma estrela luminosa e um objeto em colapso que pode ser um buraco negro com pelo menos cinco ou seis massas solares. A estrela, que é provavelmente uma anã branca, fornece a luz visível e as linhas de emissão "fixas"; o gás arrancado da estrela em um disco de acreção fornece os raios X; e admite-se que os jatos de matéria sejam ejetados ao longo do eixo de rotação do suposto buraco negro. Um mecanismo segundo o qual um buraco negro subjacente poderia ser responsável pela ejeção de dois feixes simétricos de matéria em alta velocidade a partir de uma nuvem de plasma quente e circulante foi discutido por R. D. Blandford e M. Rees em 1974 no contexto das radiogaláxias e dos quasares e teremos mais a dizer a respeito desse modelo mais adiante. Entretanto, o fato é que é perfeitamente razoável esperar a presença de dois jatos de matéria emanando da vizinhança de um buraco negro acrescente.

Existem, portanto, consideráveis provas circunstanciais para a proposição de que o SS 433 possa conter um buraco negro, mas outras possibilidades foram sugeridas. D. S. de Yound e G. Burbidge, por exemplo, propuseram um modelo envolvendo nuvens de gás capturadas em fortes campos magnéticos acima dos pólos de uma anã branca e sugerem que isto poderia explicar o aspecto observado de uma forma mais prosaica. No início de 1980 D. Crampton, A. P. Cowley e J. B. Hutchings, do Observatório Astrofísico Dominion (Canadá) publicaram

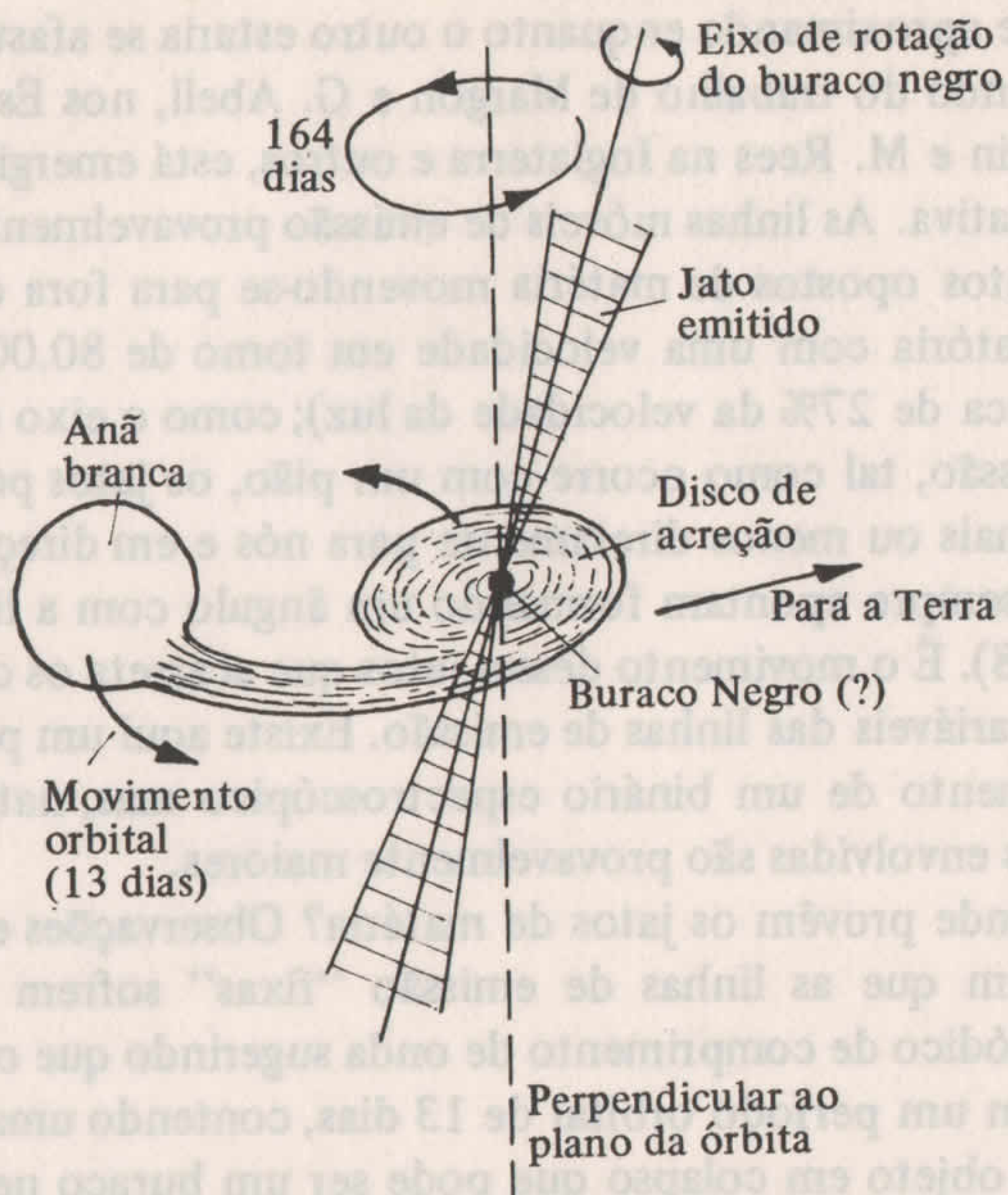



Fig. 38 Possível modelo da peculiar fonte SS 433. *A natureza deste objeto acha-se discutida no texto. Uma possibilidade, proposta por P. G. Martin e M. J. Rees de Cambridge, é que ele consiste de um buraco negro e uma anã branca em um sistema binário. A matéria oriunda da anã branca está sendo extraída em um disco circulante de gás quente – um disco de acreção – ao redor do buraco negro; nas regiões centrais deste disco a matéria está sendo expelida em dois jatos estreitos. A anã branca e o buraco negro do qual se suspeita revolvem ao redor um do outro em um período de 13 dias e a precessão dos jatos, ou oscilação ao redor do plano perpendicular até o plano orbital, é realizada em um período de 164 dias.*

resultados espectroscópicos sugerindo que os componentes do binário tivessem menos de duas massas solares, estando neste caso envolvida uma estrela-nêutron acrescente. O assunto, portanto, continua em aberto.

Clark e Murdin encaram a SS 433 como um buraco negro formado na explosão da supernova responsável pelos remanescentes W50, emissor de rádio, e apontam para as semelhanças com Circinus X-1. Se eles estiverem certos, esta proposta estabeleceria interessantes laços

entre supernovas e os buracos negros e demonstraria que as estrelas-nêutrons não são os únicos remanescentes possíveis desses eventos. Agora buscamos tipos de objetos similares.

Teria o Sol um buraco negro como companheiro?

COM BASE nos dados obtidos a partir dos pulsares, E. R. Harrison sugeriu em 1977 que o Sol pode ter uma companheira – isto é, que possa ser um componente de um binário amplamente separado ou que pode ter feito uma associação temporária com outro objeto de massa estelar. Os dados obtidos a partir dos períodos de pulsares selecionados parecem mostrar uma nítida distribuição de freqüências que poderiam ser interpretadas em termos do efeito Doppler se o sistema solar estivesse sujeito a uma ligeira aceleração devida à atração gravitacional de um corpo de grande massa até agora não detectado. Em 1978 o assunto foi desenvolvido por S. Pinealt, da Universidade da Colúmbia Britânica, que sugeriu que se existisse tal companheira, teria de ser uma estrela-nêutron ou um buraco negro, uma vez que uma estrela de pequena massa ou uma tênue anã branca com a massa e a distância adequadas teriam sido detectadas nas varreduras do céu com raios infravermelhos. O índice de aceleração, se é que esta existe, é muito pequena – cerca de 10^{-8} metros por segundo (um bilionésimo da aceleração devido à gravidade ao nível da superfície da Terra) e sua direção implicaria que a suposta companheira se localiza dentro de uma grande área de incerteza centrada em direção às constelações da Águia e Ofiúco.

Pinealt sugere através de sua análise que os números obtidos por Harrison são coerentes com diversos modelos que variam desde uma estrela-nêutron com uma massa solar a uma distância de cerca de 800 unidades astronômicas até um buraco negro com 150 massas solares a uma distância em torno de 9.000 unidades astronômicas (cerca de 50 dias-luz). Se existe uma companheira, sua associação com o Sol é provavelmente temporária, resultante de um encontro casual. Uma intrigante proposta feita por Pinealt é que os efeitos da lente gravitacional deveriam ser detectáveis à medida que este corpo hipotético em colapso passa diante das estrelas ao fundo e que um número significativo de eventos deste tipo teriam lugar todos os anos.

Trata-se de uma possibilidade fascinante e que merece ser investigada. A descoberta de um buraco negro tão próximo ao sistema solar

abriria a possibilidade do envio, com a tecnologia do século XXI, de uma sonda que poderia atingir o buraco negro dentro de um período relativamente curto.

Entretanto, não devemos colocar nossas esperanças nesta possibilidade tão remota, uma vez que existem demasiadas incertezas em relação aos dados disponíveis e sua interpretação. No momento, nossa melhor expectativa de detectar buracos negros de massas estelares permanece nos binários emissores de raios X contendo companheiros invisíveis de grande massa, tais como Cisne X-1, Circinus X-1 e talvez SS 433. Possuímos grande quantidade de provas circunstanciais, mas certamente não são suficientes para chegarmos a uma conclusão.

Maxiburacos negros, núcleos galácticos e quasares

EM PRINCÍPIO, poderiam existir buracos negros contendo milhões ou mesmo bilhões de massas solares. Se eles realmente existem, como podemos esperar encontrá-los e onde devemos procurar? Tal como ocorre com os buracos negros de massa estelar, devemos buscar os efeitos de seus poderosos campos gravitacionais que seriam mais evidentes, por exemplo, sobre o movimento das estrelas existentes em sua vizinhança. Na verdade, em se tratando de buracos negros possuidores de supermassas, galáxias inteiras poderiam ser distorcidas gravitacionalmente. Deveríamos esperar que esses buracos negros acrescessem matéria a partir de seus arredores para se transformar em poderosas fontes de energia que, em escala astronômica, seriam muito compactas, pois o raio de Schwarzschild de um buraco negro contendo 50 milhões de massas solares é igual ao raio da órbita da Terra, enquanto um buraco negro contendo toda uma galáxia como a nossa teria um raio de apenas 1 trigésimo de um ano-luz. Os efeitos da lente gravitacional constituem outro aspecto a ser observado.

O melhor caminho para os caçadores de buracos negros seria talvez buscar poderosas e compactas fontes de energia resultante da acreção em buracos de grande massa. A matéria é mais densamente concentrada dentro das galáxias do que no espaço entre elas e dentro das mesmas a maior concentração de matéria pode ser encontrada na região central. O ardoroso caçador de buracos negros pode encarar os núcleos das galáxias, portanto, como o campo mais provável para a sua busca. Existe alguma prova a favor desta assertiva?

Durante as últimas duas décadas demonstrou-se a existência de uma assustadora variedade de fontes de luz, radioondas e outras radiações muito além dos limites da nossa galáxia. Esses misteriosos objetos compartilham uma necessidade comum de uma fonte compacta de energia capaz de fornecer muito mais energia do que todo o débito energético das galáxias convencionais como a nossa própria. Entre as espécies da fauna astronômica que apresenta esta necessidade de energia acham-se as radiogaláxias, os quasares, os objetos BL Lacertae, as galáxias do tipo N, as galáxias em explosão e outros objetos peculiares, todos considerados em geral como galáxias contendo núcleos centrais hiperativos. A luz de uma galáxia normal provém principalmente dos bilhões de estrelas espalhadas por uma região do espaço com cerca de 100.000 anos-luz de diâmetro; a radiação que causa o aspecto notável das fontes catalogadas acima não provém de fontes térmicas como as estrelas – algum outro mecanismo se faz necessário.

As radiogaláxias são poderosas fontes de ondas de rádio; foram identificadas pela primeira vez como galáxias ópticas em 1948. Naquele ano W. Baade e R. Minkowski, do Observatório de Palomar, mostraram que Cisne A, a mais brilhante fonte de rádio no céu, coincide em posição com uma peculiar galáxia cuja aparência "dupla" sugeriu a esses investigadores que estivessem observando um par de galáxias em colisão. Cisne A se localiza a uma distância em torno de um bilhão de anos-luz e seu débito em ondas de rádio é prodigioso – comparável ao débito energético de um trilhão de sóis.

Desde aquela época muito mais radiogaláxias foram descobertas, algumas possuindo uma fonte de emissão de rádio concentrada no centro da galáxia, porém, a maior parte delas exibindo um aspecto característico de "duplo lobo", com duas regiões emissoras de rádio em lados opostos da galáxia visível, a distâncias acima de 10 milhões de anos-luz (Fig. 39). Certo número dessas fontes duplas parece possuir uma fonte central compacta, emitindo prodigiosas quantidades de energia a partir de uma região com menos de algumas dezenas de anos-luz de diâmetro: na verdade, medidas obtidas pela técnica denominada interferometria demonstraram que, em alguns casos, a fonte central de rádio é consideravelmente menor do que um ano-luz de diâmetro.

A emissão de rádio a partir dos lobos é de um tipo conhecido como radiação sincrotron, constituída caracteristicamente por elétrons altamente energéticos, movendo-se a grandes frações da velocidade da luz sob a influência de campos magnéticos. Uma grande quantidade de

energia tem de ser fornecida a esses elétrons e acredita-se que os radiolobos observados consistam de nuvens de material ejetado dos núcleos das galáxias centrais. É claro que algum tipo de fonte compacta de energia está envolvida aqui.

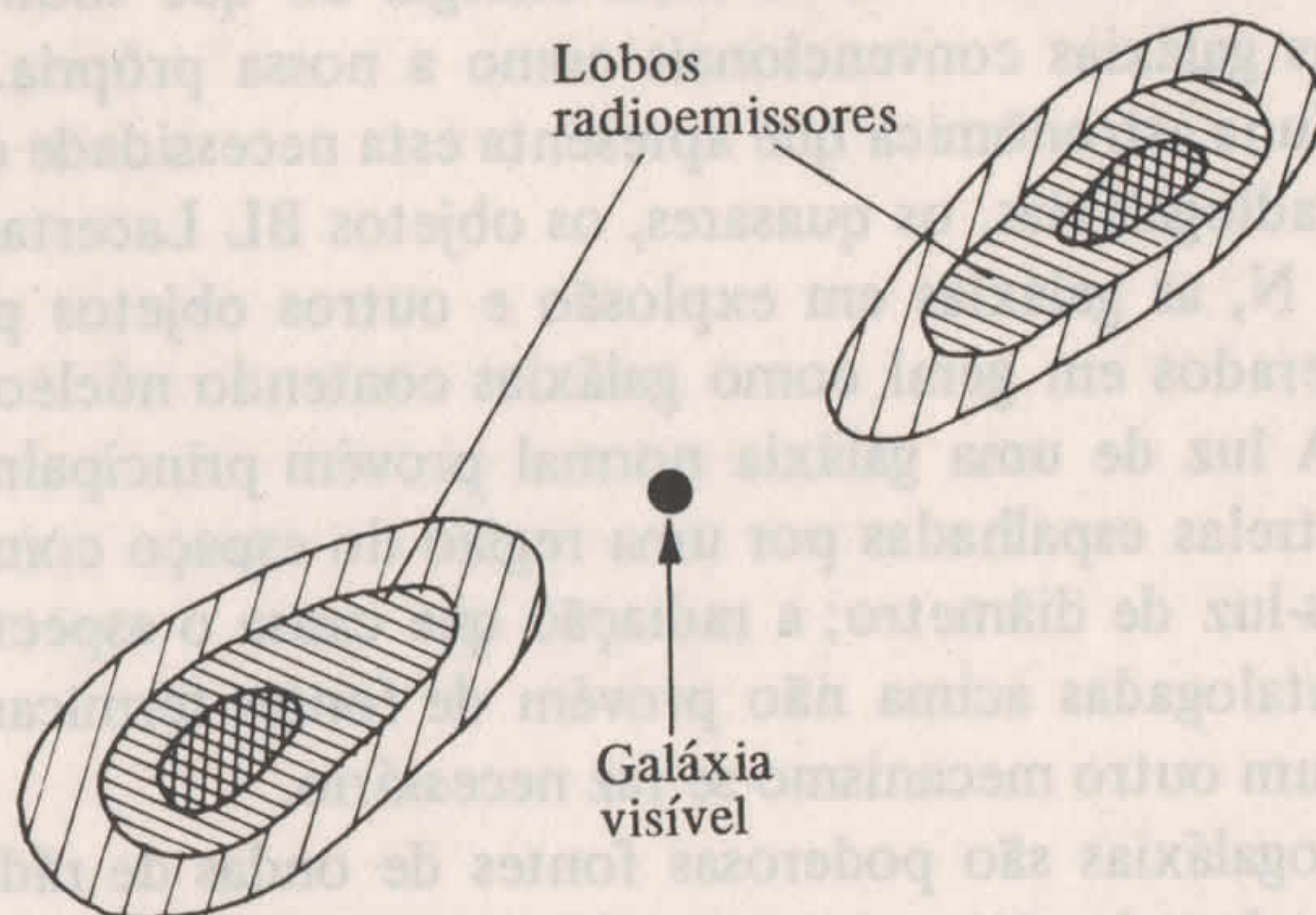



Fig. 39 A estrutura de uma típica radiogaláxia. *A galáxia central visível aos telescópios ópticos freqüentemente possui duas regiões radioemissoras gigantescas, uma de cada lado, abrangendo uma região do espaço muito maior do que a própria galáxia. O radiomapa mostra os contornos de igual intensidade de emissão, sendo a maior intensidade do sinal concentrada dentro dos contornos mais internos, tal como no exemplo idealizado.*

OS QUASARES – termo que representa uma abreviatura de *quasistellar radio sources* (fontes de rádio quase estelares) – representam provavelmente os mais energéticos e mais intrigantes de todos os fenômenos astronômicos. Embora tenhamos tomado conhecimento de sua existência há cerca de 20 anos, ainda existe considerável polêmica a respeito de sua verdadeira natureza. Apesar do fato de que um modelo plausível para explicar seu comportamento está ganhando ampla aceitação, ainda existem muitas teorias alternativas e opostas e ninguém pode afirmar que o mistério foi resolvido para a satisfação de todos.

O primeiro quasar a ser identificado foi o objeto conhecido como 3C 273 (seu número no Terceiro Catálogo Cambridge de radiofontes). Em 1962, C. Hazard e seus colegas, utilizando o radiotelescópio de 64 metros do Observatório Parkes, na Austrália, conseguiram determinar a

posição da fonte com grande precisão cronometrando o instante em que a borda da Lua passava a sua frente – e de fato verificaram que a fonte era dupla. A fonte foi identificada com um ponto semelhante a uma estrela em uma chapa fotográfica tirada com o telescópio de 5 metros do Monte Palomar; ficou esclarecido que o mais fraco dos dois radiocomponentes coincidia com o objeto semelhante a uma estrela, enquanto que o componente mais intenso localizava-se ao final de um fino jato de luz que partia da "estrela".

A surpresa astronômica que colocou os quasares na crista da onda da pesquisa astronômica ocorreu no ano seguinte quando M. Schmidt, dos Observatórios Hale, estudou o espectro óptico do 3C 273 e encontrou um desvio para o vermelho de 0,158 o qual, se interpretado como um desvio Doppler, implica que o quasar deve estar se afastando de nós a 15% da velocidade da luz. Se admitirmos que o 3C 273 localiza-se além das fronteiras da nossa galáxia e sua velocidade de recessão se deve à expansão geral do Universo, como as galáxias revelam, então ele deve se localizar a uma distância aproximada de três bilhões anos-luz. Assim sendo, para parecer tão brilhante como o vemos, teria de estar emitindo energia ao nível de 10^{40} watts, um débito energético centenas de vezes maior do que o de uma galáxia como a nossa. Entretanto, apesar de seu fenomenal brilho, o quasar era muito pequeno. Medidas diretas mostraram que a fonte 3C 273 B (a que coincide com o corpo estelar) também é dupla, em uma escala de apenas alguns anos-luz, e variações de brilho revelaram que a principal fonte de energia é provavelmente menor do que um ano-luz de diâmetro. Como pode uma fonte tão pequena fornecer tanta luz quanto uma centena de galáxias?

Muitos outros quasares foram descobertos desde então e, embora nem todos sejam radioemissores, compartilham as características de serem compactos, possuírem grandes desvios para o vermelho e, em muitos casos, apresentarem significativas variações de brilho em períodos de tempo de um ano ou menos. Os quasares, em sua maioria, emitem intensamente na região infravermelha do espectro e observações recentes pelo Observatório Einstein mostraram que pelo menos 60 quasares também são poderosas fontes de raios X. Um desses quasares emissores de raios X, o OX 169, varia de intensidade de um fator de dois ou três dentro de um período aproximado de 100 minutos, o que implica que a principal fonte de energia deve ter menos de metade do tamanho do sistema solar. Certamente uma espécie muito especial de fonte compacta de energia é necessária para os quasares.

Nem todos os astrônomos ficaram felizes a princípio (e alguns continuam infelizes) com a idéia dos quasares se encontrarem a tão grandes distâncias. Uma corrente de pensamento sugeriu que eles eram objetos locais, possivelmente expelidos de nossa galáxia e se afastando a altas velocidades. Se assim fosse, então não precisariam ser emissores tão poderosos de radiação. Por outro lado, pareceria estranho que nossa galáxia apenas representasse a origem desses objetos: se os quasares foram expelidos do centro da galáxia, teriam de estar agora a consideráveis distâncias a fim de parecerem tão uniformemente distribuídos ao redor do firmamento. Se "nossos" quasares estão a tais distâncias da galáxia, então certamente devemos esperar que existam quasares ejetados de outras galáxias e encontrar alguns deles mostrando um desvio para o azul à medida que avançam em nossa direção. Existe algo desconfortavelmente geocêntrico quanto a uma teoria que sugere que somos nós o único centro de um importante sistema de fontes astronômicas.

Desvios para o vermelho gravitacionais – em oposição aos desvios recessionais – foram invocados como outra possível explicação, mas este mecanismo mostrou-se insatisfatório para explicar todos os desvios para o vermelho observados. Mesmo que explique parte do desvio para o vermelho, ainda ficamos com uma grande parcela de desvios devidos à recessão cosmológica e o problema da prodigiosa energia permanece.

Levantamentos da distribuição dos quasares apóiam a idéia de que eles realmente se encontram a distâncias muito grandes e a maior parte dos astrônomos aceita este fato. Existem alguns resultados anômalos, contudo. H. Arp e outros, por exemplo, encontraram exemplos de quasares tão próximos a galáxias a ponto de tornar altamente improvável que se trate apenas de um efeito de linha de visão; entretanto, os quasares têm desvios para o vermelho muitíssimo maiores do que as galáxias. Talvez esses quasares estejam na verdade associados a elas e a diferença em desvio para o vermelho se deva a gravitação ou algum processo ainda desconhecido.

Os desvios para o vermelho, considerados isoladamente, indicariam que o quasar mais próximo está a cerca de 800 milhões de anos-luz e o mais distante até agora descoberto cerca de 16 bilhões de anos-luz. Entretanto, ao lidar com valores tão grandes como este último, nossa interpretação da distância é afetada pela geometria global do Universo, assim como a erros potencialmente grandes de observação e não devemos considerá-los literalmente.

Existe outro aspecto ainda mais intrigante de alguns quasares. Os

componentes centrais emissores de rádio (isto é, aqueles contidos dentro da região central, com diâmetro em torno de algumas dezenas de anos-luz) de alguns deles, inclusive o 3C 273, parecem estar se expandindo, ou separando, com velocidades aparentes maiores do que a velocidade da luz. No caso de 3C 273 foi deduzida uma velocidade de expansão em torno do *3c* e, no caso do 3C 84, foram deduzidas velocidades tão grandes como *8c*. Se essas velocidades são reais então estamos assistindo à violação de um dos axiomas mais fundamentais da teoria da Relatividade – e isto solapa as bases de toda a física moderna.

Existe outra explicação? Numerosas possibilidades foram sugeridas, variando da admissão de que os quasares estejam mais próximos do que seus desvios para o vermelho sugerem, de tal forma que a velocidade *angular* de separação medida corresponde a uma menor velocidade *linear*, até arranjos geométricos segundo os quais as fontes que se afastem com velocidades próximas, porém menores, do que a velocidade da luz podem *parecer* estar se separando a velocidades mais altas do que a da luz.

É fácil imaginar uma situação na qual possa surgir um movimento aparentemente mais rápido do que o da luz. No exemplo apresentado na Fig. 40, um sinal viajando com a velocidade da luz a partir da fonte puntiforme atinge um bastão feito de material fluorescente, atingindo primeiro o meio do bastão. À medida que o sinal progressivamente atinge outros pontos do bastão, são emitidos breves clarões de luz. O que o observador verá é um clarão de luz que se divide em dois pontos que aparentemente se afastam a uma velocidade bem maior do que a da luz. De fato, os dois pontos luminosos não foram ejetados do centro do bastão a velocidades maiores do que a da luz; o que ocorre simplesmente é que diferentes partes do bastão são iluminadas em instantes diferentes de tal forma que a geometria da situação dá a impressão de dois objetos em movimento.

Modelos geométricos adequados envolvendo jatos ou nuvens ejetadas afastando-se de uma fonte central podem ser usados para explicar a aparente separação mais veloz do que a luz das fontes de rádio e podemos provavelmente respirar fundo por ainda estar intacta a barreira da velocidade da luz!

AS GALÁXIAS DE SEYFERT são galáxias de uma categoria reconhecida pela primeira vez em 1943 pelo astrônomo norte-americano Carl

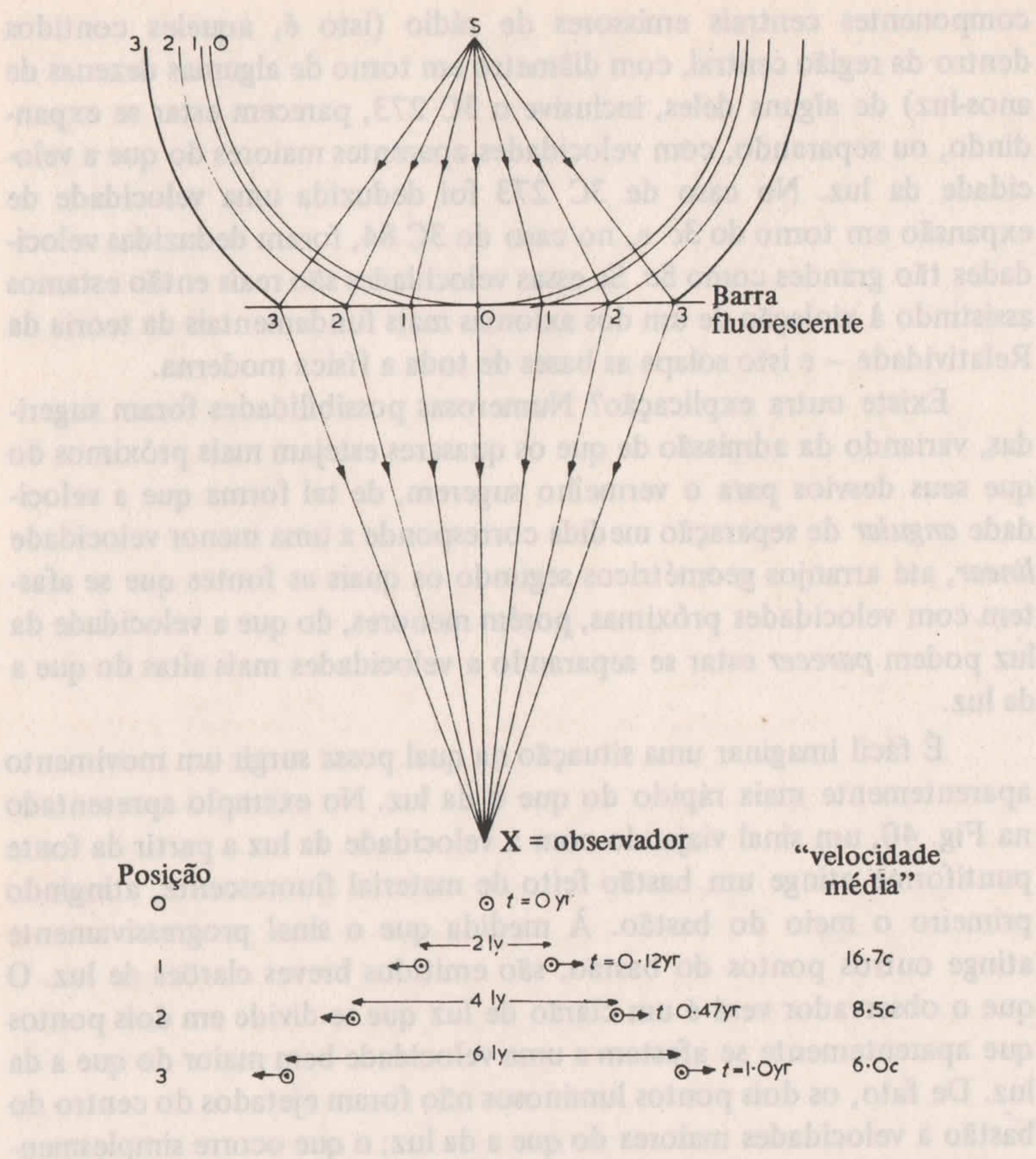



Fig. 40 Aparente movimento mais rápido do que a luz. *Neste exemplo inteiramente hipotético imaginamos uma estreita barra de material fluorescente, qualquer ponto da qual emitiria um clarão de luz quando atingido por um fóton de radiação eletromagnética. Imagine um pulso emitido simetricamente da fonte S. Ele atingiria a barra primeiro no centro (posição zero) e então sucessivamente nos pontos 1, 2, 3 ao longo da barra de cada lado de zero. A luz da barra atingiria o observador X primeiro a partir de zero e em seguida dos pontos 1, 2 e 3.*

Admitindo-se que a barra fluorescente possua seis anos-luz de comprimento e que haja quatro anos-luz entre ela e o ponto S e 8 anos-luz entre ela e o ponto X, os pontos 1, 2 e 3 localizam-se a distâncias de 1, 2 e 3 anos-luz a partir de zero. Os clarões oriundos de S atingiriam

Seyfert. Parecem ser galáxias em espiral (nossa própria galáxia é uma espiral) com núcleos extremamente brilhantes, mostrando seus espectros a presença de gás excitado movendo-se a velocidades de vários milhares de quilômetros por segundo. Mais brilhantes do que as galáxias normais, em fotografia de curta exposição parecem muito com estrelas porque emitem muita luz a partir do seu núcleo central compacto. As galáxias de Seyfert, em sua maioria, são brilhantes na região infravermelha do espectro, mas não particularmente ativas em termos de ondas de rádio. As fontes de rádio centrais mostraram-se demasiadamente pequenas para serem resolvidas pelas técnicas existentes e mostrou-se possível apenas estabelecer limites superiores. O núcleo da Seyfert NGC 4151 foi fotografado por um telescópio conduzido em balão, mostrando-se menor do que 20 anos-luz de diâmetro – este representa um limite superior, uma vez que flutuações de brilho indicam uma região emissora central não maior do que alguns anos-luz de diâmetro e talvez muito menor ainda.

Os quasares, as galáxias de Seyfert e os componentes centrais das potentes radiogaláxias exibem características estreitamente similares por possuírem poderosas, compactas e variáveis fontes de energia. A mais "conveniente" fonte disponível é um buraco negro acrescente e é tentador encarar cada uma dessas entidades como uma diferente manifestação da mesma espécie básica de objeto – uma galáxia com um núcleo violentamente ativo contendo um buraco negro central que, em virtude de seu campo gravitacional, atua como a usina de força respon-

zero após 4 anos e atingiriam X 8 anos mais tarde. Devido à distância extra que tem de viajar, o sinal não atingiria os pontos 1 a não ser 4,12 anos após partir de S, isto é, o ponto 1 emitiria clarões 0,12 anos após o ponto zero. Mas os pontos 1 estão separados por dois anos-luz e assim X, após se dar conta do fato de que os pontos 1 estão ligeiramente mais longe de si do que o ponto zero, concluirá que duas manchas de material luminoso foram "ejetadas" de zero e separadas uma da outra a uma velocidade média de 2/0,12 vezes a velocidade da luz, isto é, 16,7c. De fato, certamente não há nenhuma emissão de zero; ocorrem meramente que sinais da fonte comum S estão atingindo pontos ao longo da barra em momentos diferentes. À medida que os sinais "viajam ao longo" da barra, o índice de separação aparente diminui.

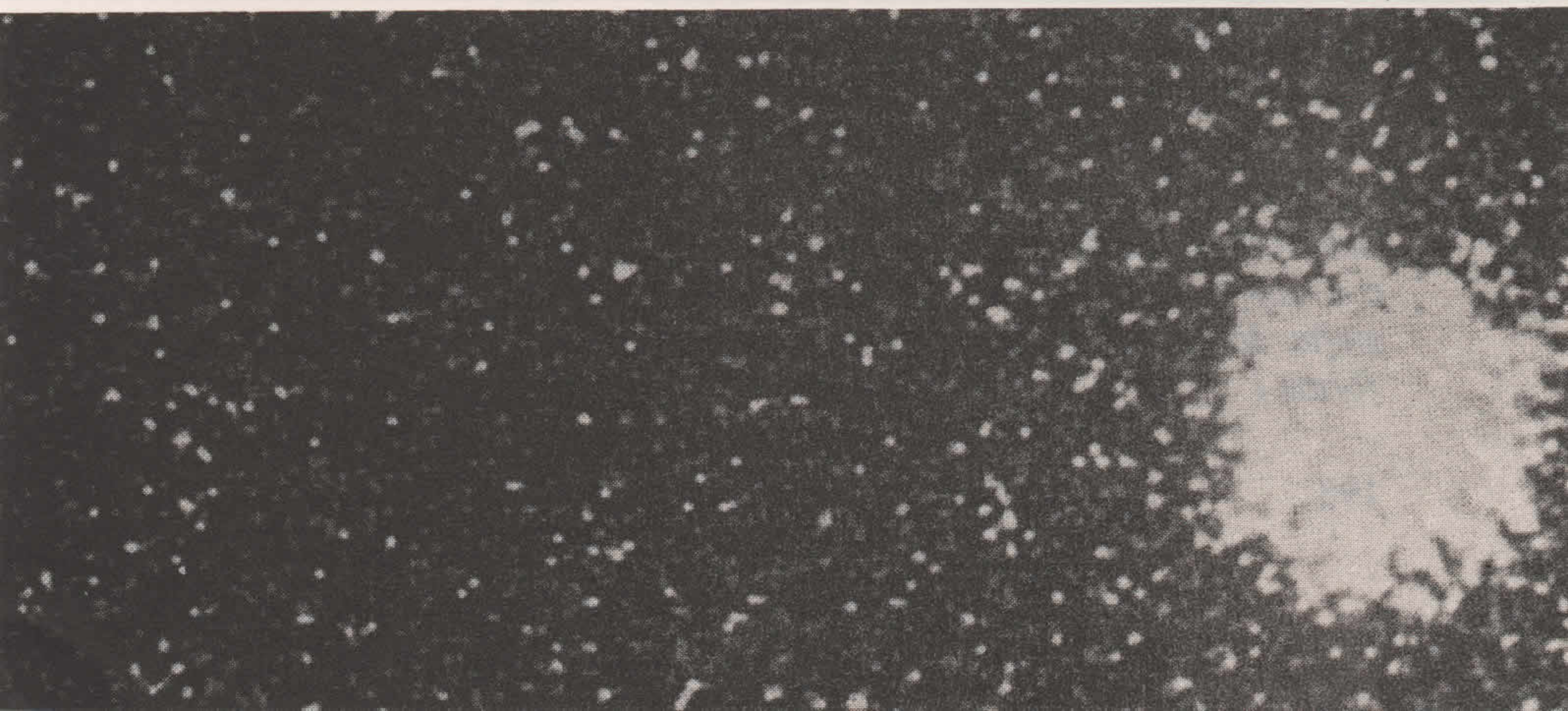
sável pelos vários fenômenos observados. Em um quasar o brilho do núcleo (o próprio quasar) é tão grande que as regiões exteriores da galáxia circundante não podem ser vistas; em uma galáxia de Seyfert a usina central seria menos poderosa, de tal forma que o restante da galáxia poderia ser observada em fotografias de longa exposição.

A diferença de luminosidade dos núcleos dependeria de numerosos fatores, notavelmente da massa do buraco negro central e da quantidade de matéria disponível para ser consumida por ele. Um buraco negro de grande massa, no qual estivessem se despenhando gás e estrelas, poderia ser o mais brilhante tipo de objeto do Universo. Admitindo que um buraco negro acrescente fosse capaz de converter a matéria que nele mergulha em energia com uma eficiência de 10%, a necessidade de combustível para manter um quasar brilhando não seria particularmente excessiva. O débito energético típico de um quasar – 10^{39} a 10^{40} watts – exigiria a digestão de não mais do que algumas massas solares por ano.

A assertiva de que as galáxias de Seyfert, as radiogaláxias e os quasares constituem diferentes aspectos do mesmo tipo de fenômeno seria mais facilmente aceitável se possuíssemos evidência direta de que os quasares representam na verdade objetos contidos no núcleo central das galáxias, mas até agora não foi possível detectar tais galáxias. Entretanto, fortes indícios provêm dos *objetos BL Lacertae*. Assim denominados a partir do BL Lacertae, que foi a princípio classificado como uma estrela variável, e identificado com uma fonte de rádio incomum em 1968, eles são fontes brilhantes e puntiformes que apresentam rápida variabilidade de grau maior e períodos menores do que os próprios quasares. Infelizmente, os espectros desses objetos tendem a ser bastante imprecisos e não exibem as óbvias linhas de emissão que permitem determinar o desvio para o vermelho dos quasares. Não obstante, durante os últimos anos, fracas linhas de emissão e absorção foram encontradas nos espectros de alguns deles e a partir daí foi possível mostrar que apresentam substanciais desvios para o vermelho e estão realmente contidos dentro de galáxias. Em alguns casos, as galáxias circundantes podem ser vistas diretamente e hoje se admite que todos os objetos BL Lacertae acham-se dentro de galáxias.

O fato dos objetos BL Lacertae serem tão semelhantes aos quasares quanto a suas propriedades, além do fato de estarem contidos dentro de galáxias, acrescenta considerável peso à assertiva que os quasares também se localizam em núcleos galácticos. Entretanto, isto

Centauro A. Uma radiogaláxia localizada a uma distância em torno de 16 milhões de anos-luz, é apresentada nesta fotografia como uma galáxia elíptica cruzada por uma faixa de poeira escura. O núcleo desta galáxia contém uma fonte compacta e variável de emissões de rádio, raios infravermelhos e raios X e foi sugerido que um buraco negro com mais de 10 milhões de massas solares possa ser a energia subjacente para este objeto solar. (Fotografia do Observatório de Palomar, Instituto de Tecnologia da Califórnia.)

Aglomerado globular M13. Muito mais de uma centena de aglomerados estelares desta espécie, cada um deles contendo algumas dezenas de milhares até um milhão ou mais de estrelas, estão associados com a nossa galáxia. A mútua atração gravitacional entre as estrelas constituintes é suficiente para manter estes aglomerados reunidos durante dezenas de bilhões de anos. Levantou-se a hipótese de que buracos negros de grande massa possam estar localizados nos centros desses aglomerados. (Fotografia do Observatório de Palomar, Instituto de Tecnologia da Califórnia.)

Galáxia de Andrômeda, M31. Localizada a uma distância em torno de 2.200.000 anos-luz, é a mais próxima galáxia em espiral destas dimensões e contém mais de 100 bilhões de estrelas. Embora um pouco maior do que nossa própria galáxia, é similar em aparência e estrutura geral. Sob boas condições pode ser visualizada sem a ajuda de um telescópio e é o objeto mais distante que pode ser visto a olho desarmado. (Fotografia do Observatório de Palomar, Instituto de Tecnologia da Califórnia.)

ainda não foi comprovado e devemos manter o espírito alerta para essa questão.

Parece hoje que toda a gama de quasares, objetos BL Lacertae, radiogaláxias, galáxias Seyfert e várias outras galáxias peculiares e perturbadas constituam na verdade diferentes manifestações do mesmo fenômeno, diferindo apenas em grau entre si. Em todos os casos a fonte central de energia pode ser um buraco negro de grande massa acrescendo material de seus arredores e liberando quantidades copiosas de energia. A acreção irregular levaria a surtos irregulares, do tipo que poderia ser responsável pelos pontos de intensa radioemissão encontrados em algumas fontes de rádio duplas e nos jatos de rádio.

Representariam estes vários tipos de objetos uma seqüência evolucionária ou constituem diferentes classes de fenômenos compartilhando o mesmo mecanismo fundamental? Foi sugerido, por exemplo, que um quasar pode evoluir até se transformar em uma radiogaláxia ou uma galáxia de Seyfert. Dois pontos de vista extremos são: (*a*) toda galáxia foi um quasar durante parte de sua vida; (*b*) um quasar permanece um quasar durante todo o tempo de vida de sua galáxia materna. Se a proposição (*a*) está correta, como os quasares são muito mais raros do que as galáxias ordinárias, a vida ativa dos quasares deve ser muito curta – não mais do que dezenas de milhares de anos. Por outro lado, se a proposição (*b*) está correta, os quasares terão de brilhar por mais de 10 bilhões de anos e teremos sérios problemas tentando explicar seu débito energético.

Os indícios de que dispomos hoje favorecem a probabilidade de que o período ativo dos quasares se encontre entre cerca de 10 milhões de anos até algumas centenas de milhões de anos e que a fase de quasar se passe apenas em uma minoria das galáxias. A fase de quasar terminaria quando o suprimento de material disponível caísse abaixo de certo limiar, provavelmente em conseqüência do esgotamento de toda a matéria disponível no núcleo galáctico e é bastante provável que os quasares "mortos" ultrapassem em número os quasares "vivos".

A presença de um lobo de material radioemissor de cada lado de uma galáxia central e localizado em uma linha através do centro desta galáxia foi considerada durante muito tempo como uma evidência da expulsão de material do núcleo das galáxias. Nos últimos anos as técnicas de interferometria permitiram aos radioastrônomos resolver pares similares

de fontes em escalas muito menores no núcleo das galáxias centrais. Os lobos, feixes ou jatos interiores possuem, em alguns casos, apenas alguns anos-luz de extensão e *estão alinhados na mesma direção dos radiolobos exteriores, muito maiores.* A fonte de rádio 3C 111, por exemplo, possui dois lobos exteriores em torno de 800.000 anos-luz alinhados na mesma direção de um par interno de lobos separados de apenas cerca de 3 anos-luz. A gigantesca fonte NGC 6251 é particularmente interessante: a partir do núcleo do objeto central emerge um jato radioemissor com cerca de 6 anos-luz alinhado com um jato muito maior com cerca de 720.000 anos-luz de extensão e ambos estes aspectos estão alinhados com os lobos ainda mais externos, cujo período é cerca de 10 milhões de anos-luz.

Observamos o mesmo padrão geral em um significativo número de fontes onde jatos centrais de matéria estão alinhados com nuvens de material radioemissor localizado talvez milhões de anos-luz à frente e assim devem ter sido expelidos do núcleo a pelo menos vários milhões de anos antes para se acharem a essas distâncias. Como pode a fonte central preservar a memória da direção na qual ejetou essas nuvens mais antigas para, milhões de anos mais tarde, expelir material fresco na mesma direção? Uma fonte de grande massa poderia permanecer estável apesar das perturbações gravitacionais e de outra natureza por tais longos períodos e os indícios favorecem fortemente a assertiva de que poderia se tratar de um buraco negro giratório de grande massa, que atuaria como um gigantesco giroscópio: jatos de material lançados ao longo da linha do seu eixo de rotação estariam assim todos apontados na mesma direção.

Vários cientistas sugeriam modelos para explicar a ejeção de material ao longo dos eixos de buracos negros giratórios. O modelo de R. D. Blandford e M. Rees (Fig. 41) considera o plasma ultraquente que se formaria a partir do material próximo ao buraco negro, em vias de nele mergulhar. As partículas altamente energéticas produzidas ali escapariam mais facilmente ao longo da linha de menor resistência, perpendicular ao plano da nuvem giratória de material mergulhante; isto é, na direção do eixo de rotação do buraco negro central de grande massa. Sob este aspecto, feixes de partículas de alta velocidade, do tipo necessário para os lobos radioemissores, seriam disparadas em direções opostas ao longo do eixo do buraco. A fonte SS 433, à qual nos referimos anteriormente, pode representar um exemplo de um duplo feixe em ação em menor escala.

Jato

Plasma
escapando

Corpo central em
colapso – fonte de energia

Nuvem circundante
de material orbital

Plasma
escapando

Jato

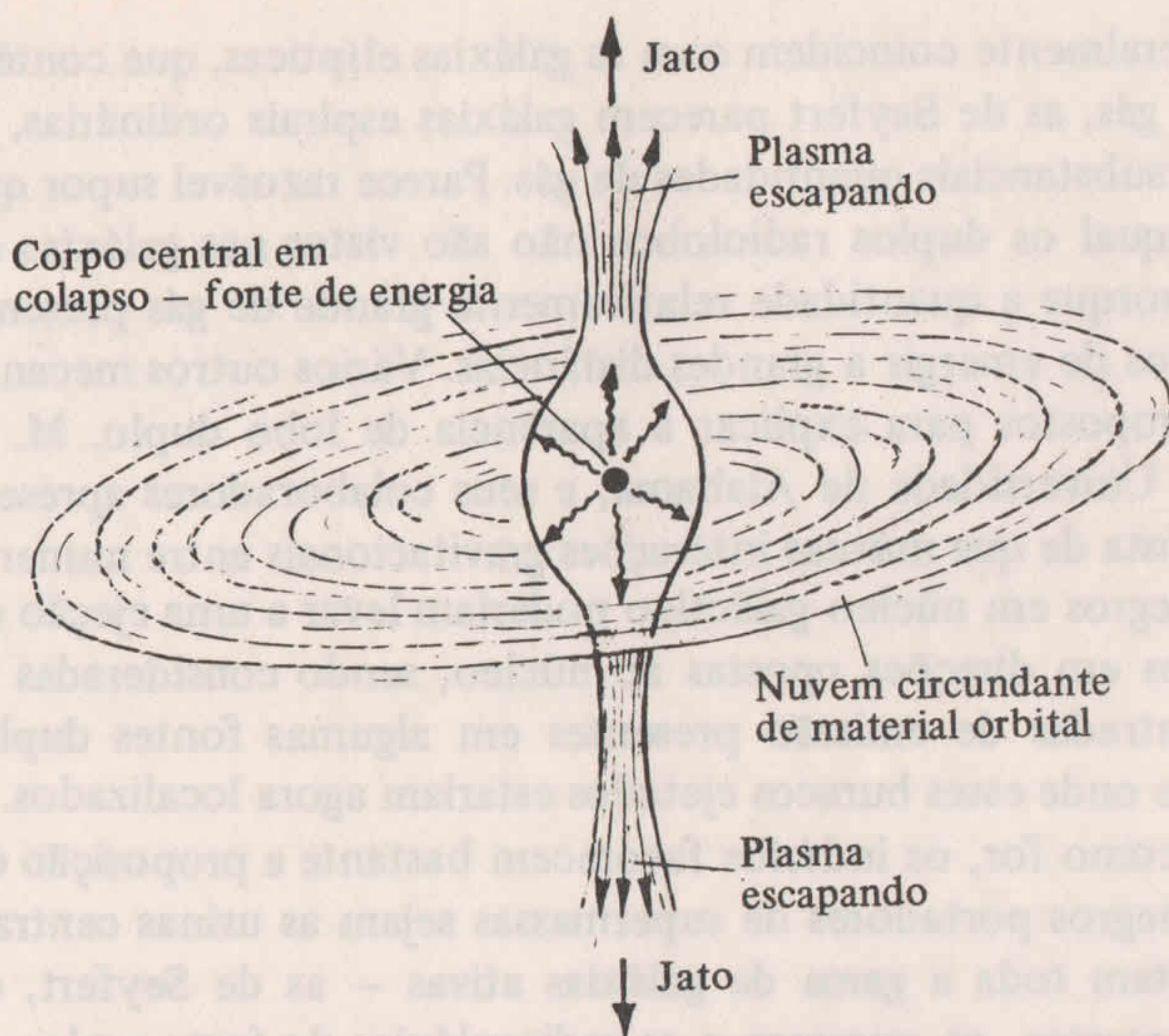



Fig. 41 Modelo Blandford-Rees para fontes de feixes gêmeos. *De acordo com um modelo criado por R. D. Blandford e M. J. Rees, uma nuvem de plasma energético quente (gás ionizado), sendo energizada por determinada fonte central de energia (tal como um buraco negro acrescente) e contida por uma nuvem de gás circulante e achatada, escapará ao longo da linha de menor resistência, isto é, será expelida através de dois jatos localizados ao longo da perpendicular à porção interna do disco circulante. Esta direção coincidirá com o eixo de rotação do buraco negro central.*

Rees sugeriu que os quasares mais violentamente variáveis podem ser aqueles cujos eixos apontam em nossa direção, assim tornando facilmente visíveis quaisquer flutuações nos jatos. Isto pode se aplicar particularmente aos objetos BL Lacertae. Ele argumenta que as linhas de emissão nos espectros dos quasares ordinários se originam em uma nuvem de material que circunda a fonte central, mas se o feixe está dirigido para nós a radiação produtora da linha de emissão seria neutralizada pelo feixe, assim explicando o fato dos objetos BL Lacertae apresentarem poucas ou nenhuma linha de emissão.

É interessante observar que as galáxias de Seyfert não apresentam a característica aparência de lobo duplo. Enquanto as radiogaláxias com

lobo duplo geralmente coincidem com as galáxias elípticas, que contêm muito pouco gás, as de Seyfert parecem galáxias espirais ordinárias, as quais contêm substanciais quantidades de gás. Parece razoável supor que a razão pela qual os duplos radiolobos não são vistos nas galáxias de Seyfert seja porque a quantidade relativamente grande de gás presente impede os jatos de emergir a grandes distâncias. Vários outros mecanismos foram propostos para explicar a aparência de lobo duplo. M. J. Valtonen, da Universidade de Alabama, e seus colaboradores apresentaram a proposta de que mútuas interações gravitacionais entre numerosos buracos negros em núcleo galáctico poderiam levar a uma ejeção de buracos negros em direções opostas ao núcleo, sendo consideradas as fontes concentradas de emissão presentes em algumas fontes duplas como os locais onde esses buracos ejetados estariam agora localizados.

Seja lá como for, os indícios favorecem bastante a proposição de que buracos negros portadores de supermassas sejam as usinas centrais que movimentam toda a gama de galáxias ativas – as de Seyfert, os objetos BL Lacertae, os quasares e as radiogaláxias de forte poder de emissão – as massas exigidas para esses buracos negros centrais variam entre 10 milhões e vários bilhões de massas solares.

Entretanto, outros modelos foram propostos. Houve quem sugerisse, por exemplo, que o núcleo de um quasar consiste de uma estrela de grande massa e altamente luminosa ou de um aglomerado concentrado de estrelas de grande massa onde supernovas estão explodindo e uma espécie de reação em cadeia. Outra sugestão é que o que está envolvido é uma massa em colapso que ainda não atingiu inteiramente a fase de buraco negro mas é apoiada por intensos campos magnéticos circulantes – um "magnetóide" ou "spinar".

O problema que surge com a maior parte desses objetos alternativos é que eles deveriam, em qualquer situação, evoluir rapidamente para buracos negros de supermassa. Certamente uma estrela de supermassa faria isso em um tempo muito curto e um spinar perderia energia e provavelmente entraria em colapso até atingir o estado de buraco negro dentro de no máximo um milhão de anos. As estrelas que constituem um aglomerado de grande massa deveriam perder energia à medida que ocorressem mútuos encontros (se muitas delas passaram através da etapa de supernova devem ser hoje buracos negros), como conseqüência disso elas eventualmente se fundiriam para gerar um buraco negro. Seria como se todo corpo ou coleção de corpos de grande massa no centro da galáxia devesse formar eventualmente um buraco negro.

Certamente é simples aceitar o modelo de buraco negro como o mais singelo e, atualmente, mais plausível. Como o Professor Martin Rees assinalou, o modelo de buraco negro de supermassa é o melhor que existe no mercado no momento.

Existem numerosas maneiras pelas quais os buracos negros de supermassa poderiam se formar no centro das galáxias – por exemplo, o colapso direto de uma nuvem de gás; o colapso de uma estrela de grande massa que evoluiria muito rapidamente, representando sua fase estelar uma breve pausa no colapso de sua nuvem de gás; o crescimento por acreção de um buraco negro formado pelo colapso de uma única estrela de grande massa; ou o crescimento, por acreção, de um buraco negro formado antes da galáxia que agora o circunda. Neste último contexto, existem alguns indícios (veja Cap. 11), sugerindo que pode ter havido um surto de formação estelar em uma era primitiva antes das galáxias se tornarem entidades organizadas; na verdade, foi sugerido que buracos negros de grande massa podem ter proporcionado as sementes ao redor das quais as galáxias se formaram.

Não faltam hipóteses – comprová-las é outra questão. Existem várias fontes específicas onde os indícios de um buraco negro central são muito sugestivos.

A galáxia elíptica M87, na constelação de Virgem, é um desses casos. Fotografias de curta exposição revelam um estreito jato de luz emanando do núcleo e as observações com o radiotelescópio indicam que a M87 é uma poderosa emissora que também pode ser fonte de surtos de rádio de curta vida. Também é uma fonte de raios X. Em 1978 W. L. W. Sargent e P. J. Young dos Observatórios Hale, A. Boksengerg e K. Shortridge do University College, Londres, C. R. Lynds do Observatório Nacional de Kitt Peak, e F. D. A. Hartwick, da Universidade de Victoria, publicaram resultados espectroscópicos demonstrando que estrelas a uma distância de menos de 300 anos-luz do centro da galáxia estavam se movendo sensivelmente mais depressa que aquelas localizadas mais longe. Para explicar isto, deveria existir uma massa muito grande concentrada no núcleo da galáxia. Os resultados eram coerentes com a existência de um buraco negro central com cerca de 5 bilhões de massas solares.

Uma investigação paralela realizada por P. J. Young, J. A. Westphal, J. Kristian e C. P. Wilson, dos Observatórios Hale e F. P. Landauer, do Laboratório de Jatopropulsão da NASA, examinou a brilhância superficial da galáxia e encontrou uma intensa fonte punti-

forme no centro. A luminosidade e a cor deste ponto não podem ser explicadas por uma densa concentração de estrelas ordinárias e as observações também convergem para a presença de um buraco negro com cerca de 5 bilhões de massas solares.

A M87 não é uma fonte brilhante como um quasar e acha-se virtualmente desprovida de gás. Os cálculos indicam que um fluxo de massa para dentro do buraco de apenas 1 por cento da massa solar por ano, convertida em energia com uma eficiência de apenas 0,002%, seria suficiente para explicar o débito energético da M87 e assim o buraco negro central poderia facilmente ser alimentado pela perda de massa das estrelas nas suas vizinhanças.

Uma possibilidade é que a M87 represente um quasar morto. Em um passado distante, quando mais gás existia como combustível para o buraco negro central, a M87 poderia facilmente ter sido um dos mais brilhantes quasares.

Outra fonte intrigante que despertou muito interesse é a radiogaláxia Centauro A. A uma distância de apenas 16 milhões de anos-luz, representa a radiogaláxia mais próxima e, embora não seja uma fonte particularmente poderosa, exibe a característica estrutura em lobo duplo. Opticamente é um objeto notavelmente belo, assemelhando-se a uma galáxia elíptica cruzada por uma densa faixa de poeira. Examinada aos raios X, mostrou possuir um jato que confere com características ópticas e radiotelescópicas similares. Embora a emissão de ondas de rádio (10^{35} watts) seja pequena em comparação com a de um quasar, não obstante é significativa. Dentro do núcleo da galáxia existe uma pequena e variável fonte de rádio, raios infravermelhos e raios X — as observações revelaram que a região emissora de rádio é menor do que um dia-luz de diâmetro e a fonte de raios X possui apenas algumas horas-luz de diâmetro. Embora a fonte de rádio seja pequena agora, a quantidade de energia contida nas partículas que constituem os extensos radiolobos indicam que Centauro A deve ter sido muito mais ativa no passado e pode ser que em seu núcleo resida um buraco negro com 10 milhões de massas solares ou mais, hoje em grande parte à míngua de combustível. Se estas idéias estiverem corretas, Centauro A poderia conter o mais próximo buraco negro acrescente de grande massa.

Em maio de 1979 D. Walsh, de Jodrell Bank, na Inglaterra, R. F. Caswell, de Cambridge e R. J. Weymann do Observatório Steward, no Arizona, registraram observações do que parecia ser um duplo quasar,

uma fonte (conhecida como 0957 + 561 A,B) constituída por dois quasares virtualmente idênticos de brilho muito similar, idêntico desvio para o vermelho e separados por um ângulo de apenas 5,7 segundos de arco. A distância indicada pelos desvios para o vermelho implicaria que os quasares estariam separados por apenas 220.000 anos-luz. Os quasares são objetos raros e encontrar dois com propriedades idênticas e tão próximos um do outro é algo altamente improvável.

A alternativa que os autores propuseram foi que só existia um quasar, mas que entre ele e a Terra existe um corpo com cerca de 10^{13} massas solares atuando como uma lente gravitacional. A ligeira diferença de brilho e de estrutura radiotelescópica dos dois componentes poderia ser explicada pelo fato da "lente" achar-se ligeiramente desviada para um dos lados da linha direta de visão. Diferentes grupos de radioastrônomos discordaram a respeito da detalhada radioestrutura da fonte (embora uma visão otimista pudesse distinguir uma semelhança entre as formas gêmeas em crescente que seria esperada como característica de uma fonte observada através de uma lente fora do eixo), mas os resultados ópticos de observações realizadas mais tarde, em 1979, por grupos dos Observatórios Stewart e Hale parecem ter demonstrado de forma conclusiva que uma galáxia está localizada entre os dois componentes observados, com um desvio para o vermelho de apenas um terço em relação ao do quasar).

Parece razoável concluir que é essa galáxia que está agindo como uma lente, ao invés de um buraco negro. Não obstante, se estes resultados forem confirmados proporcionarão uma notável confirmação das previsões da Relatividade Geral.

O centro da nossa galáxia está oculto aos astrônomos ópticos em virtude da existência de densas nuvens de poeira que são tão eficazes para obscurecer a luz que somente cerca de um fóton em cada 10 bilhões realmente sobrevive a essa jornada de 30.000 anos-luz até a Terra. Felizmente, radiações de outros comprimentos de onda podem penetrar a nuvem e o núcleo galáctico tem se mostrado como uma fonte de rádio, raios infravermelhos e raios X.

No centro da galáxia localiza-se uma fonte puntiforme de rádio conhecida como Sagitário A (oeste) que se verificou ser menor do que 10 unidades astronômicas em termos de diâmetro — isto é, o núcleo radioemissor da galáxia é menor do que a órbita de Saturno. Algumas das fontes infravermelhas revelaram-se gigantes vermelhas frias mas uma

delas, que coincide com Sagitário A (oeste) não pode ser explicada desta maneira. O estudo das linhas de emissão de microondas (do elemento néon) nas nuvens de gás ao nível do centro da galáxia mostram altas velocidades que podem ser explicadas admitindo que as nuvens estejam se movendo no campo gravitacional de uma massa com 5 a 8 milhões de massas solares concentradas dentro do círculo central (isto é, dentro de uma região com cerca de 3 anos-luz de diâmetro). Embora seja de esperar que as estrelas estejam concentradas mais estreitamente no núcleo do que em qualquer outro lugar, observações com infravermelho indicam que o total das estrelas no círculo central é de apenas 2 milhões de massas solares.

Assim sendo, parece existir uma massa adicional entre 3 e 6 milhões de massas solares concentrada no coração da galáxia e uma explicação plausível deste fato é que essa massa esteja contida dentro de um buraco negro de grande massa que proporciona a usina de força subjacente para a fonte compacta de rádio, infravermelho e raios X. Existem indícios, também, de violentos acontecimentos na história passada de nossa galáxia, embora não na escala associada aos quasares ou às radiogaláxias: as observações revelam nuvens de gás afastando-se do núcleo da galáxia. V. M. Clube, do Observatório Real de Edinburgo, argumenta que o objeto central é um spinar que periodicamente explode e se recompõe, dando origem a surtos de ejeção de material do núcleo; segundo ele seria necessária uma "nova física" para explicar este processo. O ponto de vista mais convencional* é que um buraco negro de grande massa seja perfeitamente capaz de explicar os fenômenos observados. Assim sendo, nossa galáxia pode albergar um buraco negro em seu núcleo e possuir surtos periódicos de atividade à medida que o índice de acreção aumenta.

Os aglomerados globulares são antigas aglomerações de estrelas que contêm desde algumas dezenas de milhares até cerca de 1 milhão de estrelas concentradas em um volume relativamente pequeno de espaço; mais de uma centena deles são conhecidos, associados a nossa galáxia. Durante muito tempo, as estrelas de maior massa de tais aglomerados parecem encaminhar-se para o centro e é possível que possam coalescer para formar buracos negros. Levantou-se a hipótese de que a acreção em

* É interessante notar como, dentro de alguns poucos anos, os modelos de buracos negros de núcleos galácticos passaram a ser encarados como a explicação *convencional*!

buracos negros de mais de alguns milhares de massas solares poderia ser responsável pela emissão de raios X observada a partir de alguns aglomerados globulares, vários dos quais apresentam "piques" de intensidade muito semelhantes aos encontrados na M87.

É intrigante, entretanto, que as fontes de raios X nos aglomerados não sejam significativamente mais brilhantes do que as associadas aos binários, onde existe acreção em uma estrela-nêutron. Muitos aglomerados globulares contêm curiosas fontes de raios X que se deslocam erraticamente, emitindo clarões e se apagando em questão de segundos.

No momento em que escrevíamos este livro duas importantes teorias a respeito estavam em foco. Por um lado poderíamos estar testemunhando surtos de raios X devidos à acreção errática de estrelas companheiras nas superfícies de estrelas-nêutrons (J. Grindley, chefe da equipe que está examinando as observações de tais eventos realizadas pelo Observatório Einstein, descreveu o material em questão como "bombas de hélio"); por outro lado, os raios X podem provir de violentas instabilidades na matéria que circula próximo ao horizonte dos eventos de buracos negros de grande massa.

Existe pouca escolha entre estas possibilidades no momento, embora a presença de "piques" de luminosidade no centro de alguns aglomerados globulares apresente provas circunstanciais a favor do modelo de buraco negro acrescente. Novas observações com os raios X e novos dados obtidos a partir do satélite de raios gama podem resolver este assunto em um futuro próximo.

Miniburacos negros

ATÉ AGORA não existe nenhuma prova sugestiva de que existam miniburacos negros. Se tais buracos existem – e trata-se de um grande "se" – devem ter se formado nos primeiros instantes do Universo e devem ser designados de forma mais adequada como buracos negros primordiais. Como vimos no Capítulo 9, buracos negros primordiais com cerca de 1 bilhão de toneladas devem estar explodindo agora e a melhor perspectiva de detectá-los poderia ser estudar os surtos de raios gama energéticos liberados nas explosões.

As chances de detectar esses buracos com os detectores de raios gama existentes são muito pequenas e mesmo as estimativas mais otimistas acreditam que seja improvável que os detectores existentes ou

projetados hoje possam captar uma explosão isolada em uma faixa maior do que uma fração de ano-luz.

Tudo que pode ser feito é colocar limites superiores. Se admitirmos que *todos* os raios gama existentes no Universo foram produzidos pela explosão de miniburacos, os cálculos feitos tanto por D. N. Page e S. W. Hawking e por G. F. Chapline implicam que não podem existir mais do que 300 milhões de buracos negros primordiais por ano-luz cúbico se os miniburacos estiverem concentrados nas galáxias. Se, pelo contrário, estiverem espalhados uniformemente através do Universo, esse valor cai para apenas cerca de 300 por ano-luz cúbico, como um *limite superior*. Pode haver muito menos (na verdade, pode não haver mesmo nenhum).

Outra possibilidade é utilizar a atmosfera da Terra como um detector de raios gama. Um raio gama de alta energia, ao atingir a atmosfera, produz radiação que, em princípio, poderia ser detectada ao nível do solo como um clarão de luz. Resultados experimentais de N. A. Porter e T. C. Weekes (University College, Dublin) indicam que no máximo existiriam duas explosões de buracos negros por século por ano-luz cúbico em nossa parte da galáxia. D. Fegan e S. Danaher (também da University College, Dublin) propuseram a utilização de 5.500 espelhos da maior usina de energia solar no mundo, nos Laboratórios Sandia, no Novo México, para captar à noite clarões de luz que podem se dever à explosão de buracos negros primordiais. No momento em que escrevíamos este livro, não havia nenhum resultado a registrar.

Uma abordagem mais promissora foi proposta em 1977 por Rees, que argumentou que as partículas liberadas pelas explosões de buracos negros interagiriam com o campo magnético da galáxia para produzir um pulso de rádio polarizado linearmente, ondas essas que poderiam ser detectadas com as técnicas existentes muito mais facilmente do que um pulso de raios gama. Em condições ideais, os radiotelescópios existentes facilmente seriam capazes de detectar tais surtos ainda que provindos de tão longe quanto o centro galáctico e o maior radiotelescópio isolado, em Arecibo, Porto Rico, poderia detectar, em princípio, uma explosão isolada tão distante quanto a Galáxia de Andrômeda! Existem muitas especulações envolvidas aqui, mas esta parece uma abordagem promissora. As análises preliminares das fontes dos levantamentos de rádio discutidos em 1977 por W. P. S. Meikle indicam que, no máximo, existe uma explosão de buraco negro primordial por ano-luz cúbico por 3

milhões de anos. Este limite é cerca de 100.000 vezes mais sensível do que o limite de detecção dos raios gama.

Finalmente quais são as possibilidades de um encontro direto? Existe a possibilidade da Terra ser atingida por um miniburaco negro? Em 1973 A. A. Jackson e M. P. Ryan, da Universidade do Texas, publicaram um comunicado interessante sugerindo que o impacto de um miniburaco negro poderia ter sido responsável pelo "evento Tunguska" que ocorreu na Sibéria em 1908. Em conseqüência de uma espécie de explosão, as árvores foram varridas em uma área de milhares de quilômetros quadrados: a princípio a explosão foi atribuída a um impacto de um grande meteorito, mas a ausência de uma cratera parece excluir isto. O miniburaco postulado por Jackson e Ryan foi considerado como portador de uma massa comparável à de um pequeno asteróide; ainda assim, ele teria menos de 1 milionésimo de centímetro de rádio e teria passado em linha reta através da Terra e saído do outro lado. Consideráveis quantidades de energia, argumentam eles, teriam sido liberadas à medida que o buraco penetrou na atmosfera e atingiu sua superfície – talvez tanta energia quanto uma bomba de hidrogênio de 20 megatons, o que teria devastado a floresta circundante. "Explicações" alternativas deste acontecimento abrangem a explosão de uma espaçonave alienígena, mas a sugestão mais razoável é de que foi o núcleo de um pequeno cometa que atingiu a Terra, explodindo na atmosfera, e assim não produzindo uma cratera grande e óbvia. Jackson e Ryan, com sua teoria do miniburaco negro – embora não tenham sido levados a sério – representam pelo menos uma visão mais plausível do que muitas outras.

Na verdade, as possibilidades da Terra ser atingida por um miniburaco negro são infinitesimais. De acordo com Bernard Carr, do Instituto de Astronomia de Cambridge, qualquer buraco com menos massa do que cerca de 10^{21} kg dificilmente produziria efeitos observáveis ao passar através da Terra e mesmo as estimativas mais otimistas só esperam um desses encontros em um período de tempo mil vezes maior do que a idade calculada do Universo. Mesmo para a pequena massa considerada por Jackson e Ryan não poderíamos esperar mais de uma colisão em 10 bilhões de anos. Diante disso, encontros diretos não representam uma promessa de detectar buracos negros, embora este argumento não exclua a possibilidade de que possam existir buracos negros primordiais, com massa apreciavelmente maior do que 1 bilhão de toneladas, em algum ponto do sistema solar.

Não possuímos no momento, portanto, qualquer prova da existência de miniburacos negros. Entretanto, possuímos boas razões para supor que estamos encontrando prova da existência de buracos negros de massa estelar em binários fechados e de buracos negros de supermassa nos núcleos galácticos e nos quasares. Existem provas crescentes a favor dos buracos negros de grande massa representarem as fontes de energia subjacentes de uma ampla variedade de violentos e enérgicos fenômenos que variam da modesta atividade do nosso próprio núcleo galáctico até as galáxias de Seyfert, as radiogaláxias, os objetos LB Lacertae e os quasares. A gravidade pode, portanto, ser a força responsável pelas entidades mais energéticas do Universo conhecido.

11
A gravidade e o Universo

A GRAVIDADE controla o movimento de todos os corpos no Universo, determina a forma do próprio espaço e governa a evolução e o destino final do Universo como um todo.

Para compreender a estrutura e a evolução do Universo temos de recolher todos os fragmentos de informações que aparecem em nosso caminho e nossa capacidade para fazer isto é controlada em grande parte pelos instrumentos e pelas técnicas disponíveis. A este respeito o astrônomo de hoje possui imensas vantagens sobre seus predecessores de apenas duas décadas atrás. O Universo é vasto; somos parte dele e não podemos colocar-nos "de fora" para encararmos sua estrutura com mais perspectiva. Não podemos ver o todo e não sabemos o que pode haver além do alcance dos nossos telescópios. Como a luz viaja a uma velocidade finita, a informação que estamos recebendo hoje de grandes distâncias está muito "ultrapassada"; não existe nenhum meio através do qual possamos ver o Universo "como ele é agora" (na verdade, como já vimos antes, não há nenhum meio de atribuir tempos absolutos aos eventos que se passam no Universo). Por outro lado, o fato das nossas informações freqüentemente se basearem em eras bilhões de anos no passado nos permite estudar diretamente como eram as condições muito primitivamente na história do Universo.

É pouco dizer que tentar compreender o Universo como um todo é uma tarefa gigantesca. Não obstante, durante as últimas duas décadas

uma teoria particular a respeito de sua origem e evolução obteve ampla aceitação e a cosmologia saiu de uma era em que havia muitas teorias mas quase nenhuma observação para uma era na qual existe grande quantidade de observações e é possível aplicar testes críticos capazes de descartar muitos modelos plausíveis do Universo. Tal é a confiança de alguns teóricos que em sua opinião toda a história do Universo pode ser retraçada até o primeiro centésimo ou mesmo até o primeiro milionésimo de segundo de sua existência.

O Universo ao nosso redor parece apresentar várias hierarquias em sua estrutura. Os planetas giram ao redor das estrelas, as estrelas estão reunidas em galáxias, as próprias galáxias são membros de aglomerados de galáxias e existem indícios sugestivos de que os próprios aglomerados possam estar reunidos em superaglomerados. Podem existir até mesmo os supersuperaglomerados.[1] Os astrônomos vêm tentando estabelecer a estrutura do Universo mediante a determinação dos movimentos e das distribuições das galáxias, as radiogaláxias, dos quasares, dos aglomerados e outros corpos celestes – a matéria *visível* no Universo. Entretanto, acumulam-se provas sugestivas de que existem mais coisas no Universo do que os olhos podem ver, e que a matéria visível pode estar ultrapassada de longe pela matéria invisível que poderia, mediante sua influência gravitacional, decidir o destino final do Universo.

Em qualquer tentativa de determinar a estrutura e a evolução do Universo um ponto central é a questão da mensuração das distâncias e é nesta área vital que existe considerável margem de erro, uma vez que a magnitude dos erros aumenta rapidamente quanto mais aumenta a distância.

Existem três abordagens básicas para medir a distância. O método primeiro, e o mais comum, essencialmente compara o brilho aparente de uma fonte com a luminosidade que esperaríamos que esta fonte possuísse; assim, se conhecemos a luminosidade que possui um particular *tipo* de estrela, podemos medir a quantidade de luz recebida de qualquer estrela daquele tipo e calcular sua distância aproximada. Esta técnica, conhecida como o método da *distância-módulo*, baseia-se sobre nossa capacidade de identificar, em galáxias distantes, tipos particulares de objetos altamente luminosos, assim como em nossa capacidade de realizar estimativas precisas de suas luminosidades. Diante de maiores distâncias as propriedades de galáxias inteiras e as propriedades estatísticas dos aglomerados de galáxias devem ser levadas em consideração e é

claro que os erros nos vários elos da cadeia de raciocínio se somam e se multiplicam.

A segunda abordagem baseia-se na identificação de objetos de tamanho conhecido (ou, pelo menos, de um tipo cujas dimensões possam ser avaliadas) – objetos dentro das galáxias ou as próprias galáxias – e na comparação de seus tamanhos angulares com seus tamanhos lineares. Esta técnica é ainda mais sujeita, potencialmente, a erros grosseiros de observação ou interpretação. Uma terceira técnica depende dos desvios para o vermelho nos espectros das galáxias e dos quasares, a respeito dos quais logo falaremos.

A distância a outra galáxia foi determinada pela primeira vez em 1923. Naquele ano E. P. Hubble (1889-1953) usou o refletor de 2,5 metros do observatório de Mount Wilson para estudar as estrelas conhecidas como Cefeidas, contidas na galáxia de Andrômeda, M31, estrelas altamente luminosas e variáveis com a característica conveniente de que seus períodos de variação estão relacionados com sua luminosidade (quanto mais luminosa a Cefeida, mais longo o seu período) de acordo com uma lei estabelecida alguns anos antes por Henrietta Leavitt (1868-1921). Medindo seus períodos foi possível para Hubble calcular sua luminosidade e, comparando esta com o brilho observado, estabelecer a distância da galáxia onde estavam localizadas.

O trabalho de Hubble sugeriu que a galáxia de Andrômeda está a uma distância em torno de 750.000 anos-luz. As revisões subseqüentes aumentaram esse número de três vezes mais.

O Universo – algumas questões básicas e uma observação fundamental

COMO ESTÁ disposto o Universo? Como se comporta e evolui? É finito ou infinito em extensão? Originou-se há um tempo finito ou sempre existiu? Continuará a existir para sempre ou eventualmente chegará ao fim?

Estas são algumas das perguntas básicas que conferem à cosmologia sua inerente fascinação. Hoje, podemos estar próximos da resposta de algumas delas.

Para Newton, o Universo tinha de ser infinito. Sua teoria da gravidade, que explicava muito bem os movimentos das estrelas e dos planetas, encontrou grandes dificuldades quando o Universo como um todo foi considerado. Se o Universo estelar era finito em extensão, com a gra-

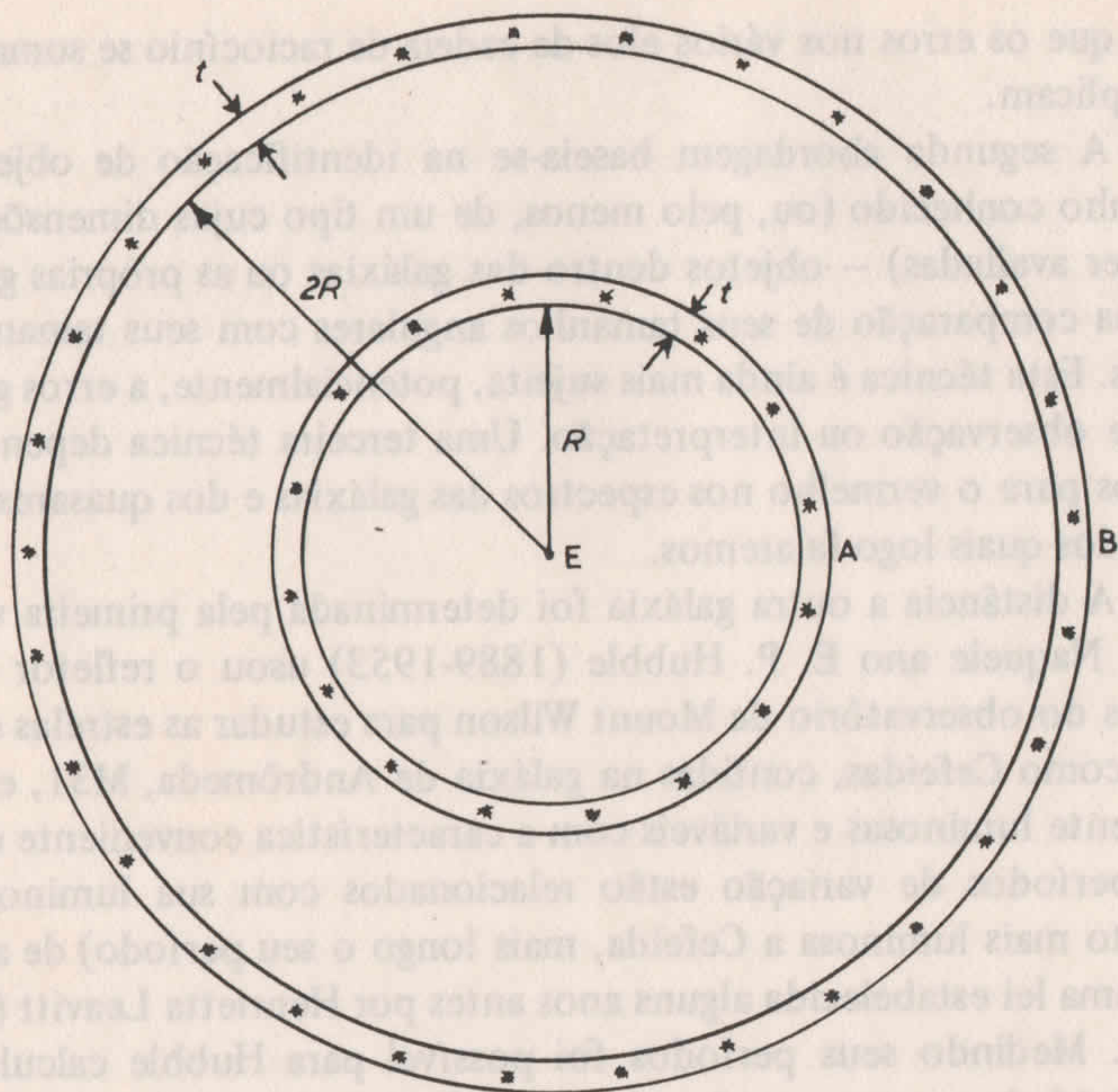



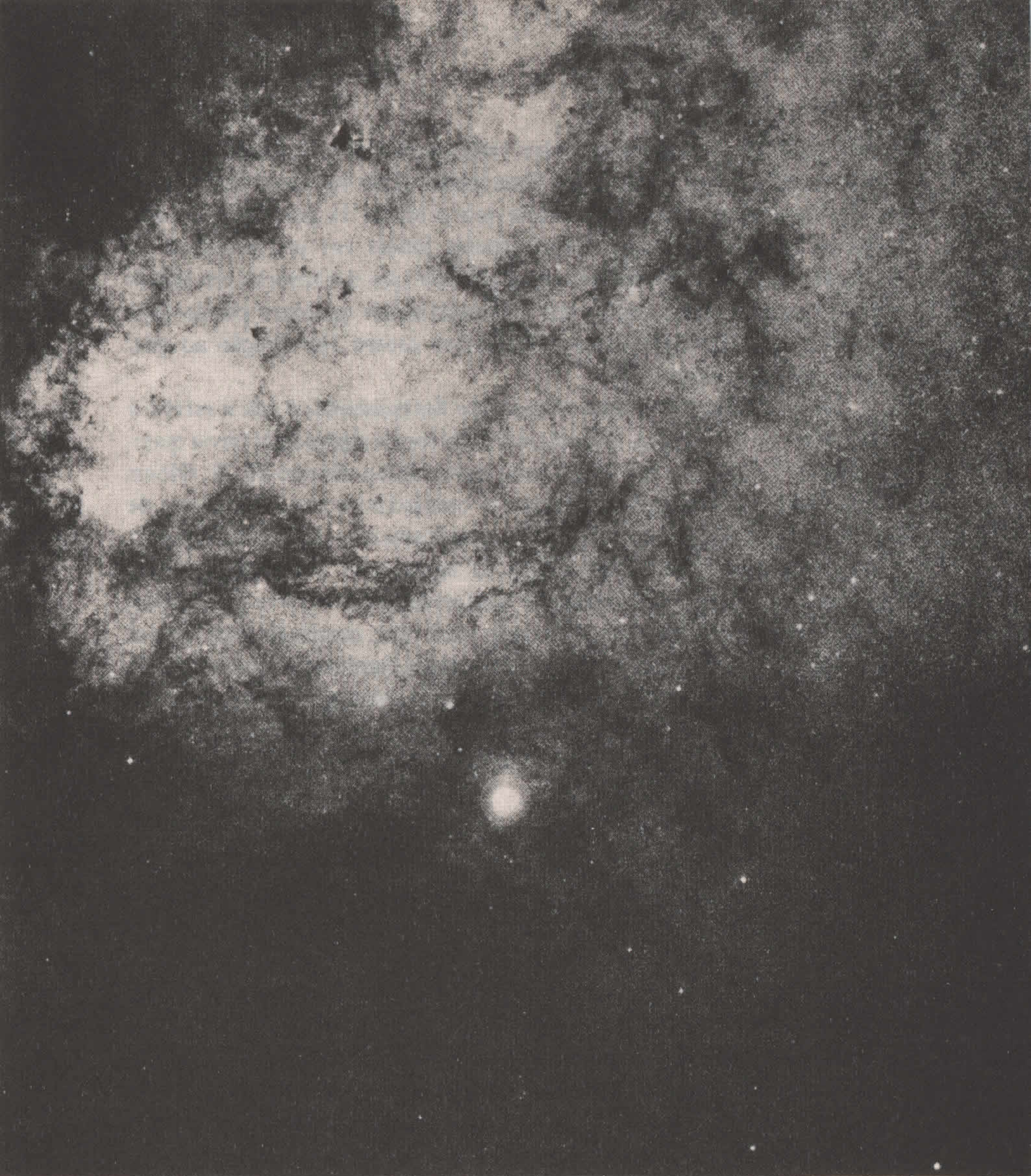
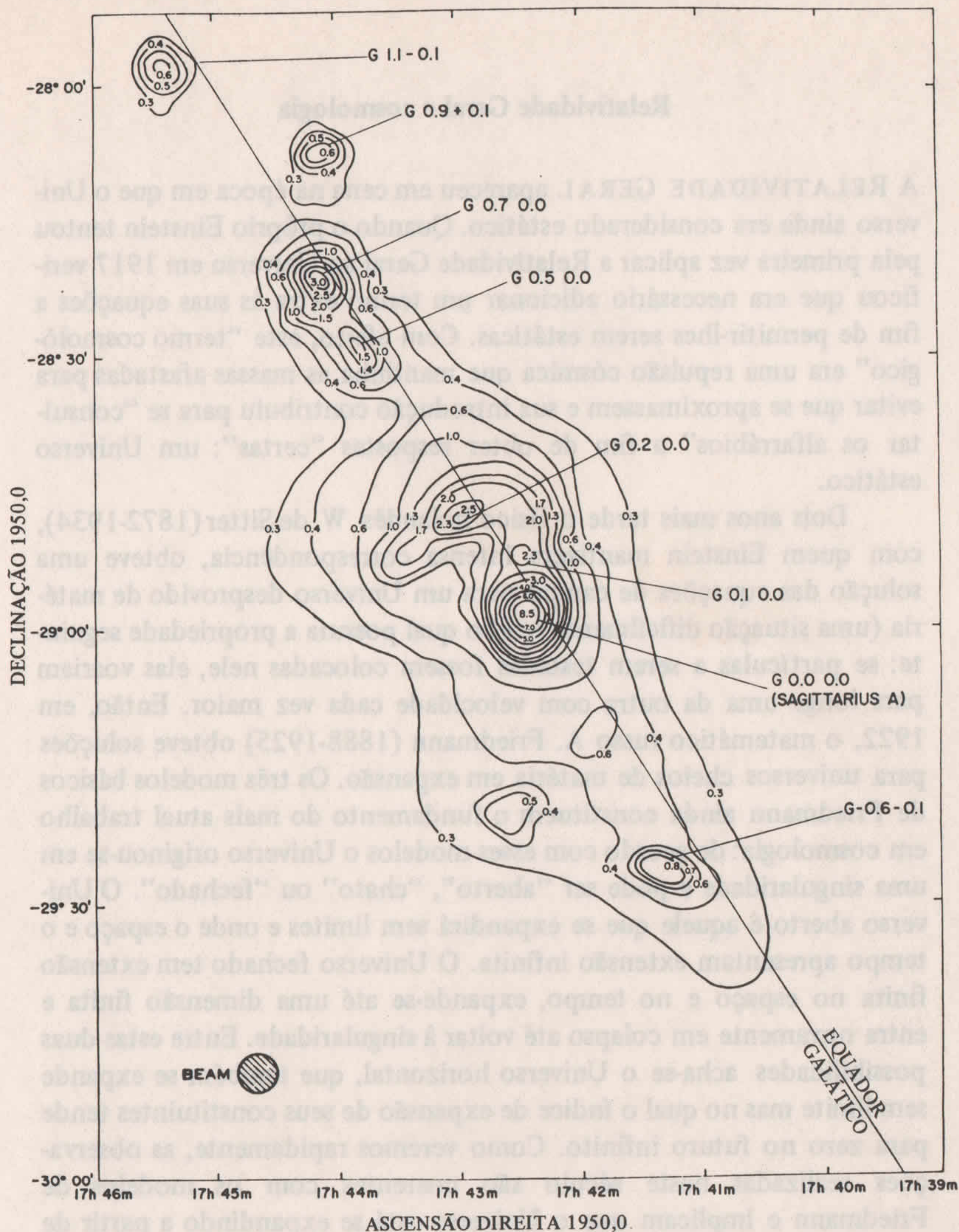
Fig. 42 Paradoxo de Olbers. *Imagine que o Universo esteja uniformemente cheio de estrelas e possua uma extensão infinita. Considere duas finas conchas esféricas desenhadas no espaço e com centro na Terra, tendo a concha B duas vezes o raio da concha A e ambas possuindo uma espessura* t. *Para fins de simplificar admitiremos que todas as estrelas emitem quantidades iguais de luz. Uma estrela na concha B está duas vezes mais distante do que uma estrela na concha A e, em virtude do brilho de uma fonte diminuir com o quadrado de sua distância, na Terra (T) receberemos somente um quarto da sua luz. O número de estrelas em uma concha depende da sua área superficial multiplicada por sua espessura (*t*). A área de uma concha depende do quadrado de seu raio: a concha B, portanto, tem uma área quatro vezes tão grande quanto a de A e assim contém quatro vezes mais estrelas do que a concha A. Os dois efeitos, portanto, se neutralizam e a quantidade de luz recebida em T de cada concha é exatamente a mesma.*

Se o Universo possuísse uma extensão infinita, poderíamos desenhar um número infinito de círculos. É claro que as estrelas em primeiro plano bloquearão até certo ponto as estrelas ao fundo, mas o

vidade atuando mutuamente entre cada partícula de matéria, por que não se colapsaria em uma massa? Uma distribuição estacionária de estrelas, embora extensa, se aglomeraria sob o efeito da gravidade até que todas as massas estivessem concentradas juntas em um ponto. Para contornar esta dificuldade Newton postulou que o Universo era infinitamente grande de tal modo que a atração sobre qualquer ponto seria "cancelada" e não haveria qualquer único centro em direção ao qual tudo o mais desabaria.

Neste contexto há uma observação fundamental: *o céu é escuro à noite*. Por que assim é? A resposta não é de forma alguma tão óbvia quanto parece. Levantado em 1826 pelo matemático alemão H. W. Olbers (1758-1840), o problema é geralmente conhecido como o Paradoxo de Olbers, embora tenha sido discutido anteriormente por Halley e por J. P. Loys de Cheseaux (1718-1751). O argumento é o seguinte: se o Universo é infinito em extensão e uniformemente repleto de estrelas, então, em qualquer direção para onde você olhe, eventualmente deverá estar olhando para a superfície de uma estrela (embora saibamos que as estrelas estão reunidas em galáxia, um argumento similar pode ser estruturado em termos de galáxias) e assim o céu inteiro deveria ser pelo menos tão brilhante quanto a superfície do Sol. O assunto é examinado de forma mais detalhada na Fig. 42.

O que podemos deduzir do fato de que o céu *é* escuro à noite? O Universo poderia ser infinito e repleto de estrelas desde que estas não estiveram brilhando através do infinito passado. Se elas começaram a brilhar há um tempo finito, não teria havido tempo suficiente para a luz nos atingir a partir das mais distantes e o problema estaria contornado. Por outro lado, é difícil saber como todas as estrelas em um Universo infinito teriam "acendido" ao mesmo tempo. A conclusão a ser tirada aparentemente é que o Universo não pode consistir de uma distribuição estacionária de estrelas infinitas em idade e extensão. A escuridão do céu coloca grandes restrições a qualquer teoria da cosmologia e faz a visão de Newton do Universo parecer altamente improvável.

resultado líquido deveria ser que o céu inteiro ficaria tão brilhante quanto a superfície do Sol. (De fato, devido ao efeito bloqueador das estrelas em primeiro plano, o Universo só precisaria de 10^{26} anos-luz de raio para que o céu inteiro fosse tão brilhante quanto o Sol.)

Campo estelar na direção do centro galático. Olhando na direção do centro da galáxia, na constelação de Sagitário, grande número de estrelas pode ser visto. Entretanto, em virtude do efeito obscurecedor da poeira interestelar, o próprio centro não pode ser observado à luz visível. (Fotografia da Unidade Telescópica Schmidt, da Inglaterra, cortesia Photolabs, Observatório Real, Edimburgo.)

Radiomapa do centro galático, representado em um comprimento de 3,75 cm por Dennis Downes e Alan Maxwell, da Universidade de Harvard. A principal fonte de radioemissão é gás ionizado. A fonte Sagitário A marca o centro da galáxia, provindo grande parte da radiação de uma região do espaço menor do que o sistema solar. Existem consideráveis debates a respeito da natureza da fonte central de energia, existem muitos indícios apoiando a assertiva de que o centro da galáxia deve albergar um buraco negro com vários milhões de massas solares. (Cortesia do Dr. Dennis Downes.)

Relatividade Geral e cosmologia

A RELATIVIDADE GERAL apareceu em cena na época em que o Universo ainda era considerado estático. Quando o próprio Einstein tentou pela primeira vez aplicar a Relatividade Geral ao Universo em 1917 verificou que era necessário adicionar um termo extra às suas equações a fim de permitir-lhes serem estáticas. Com efeito, este "termo cosmológico" era uma repulsão cósmica que mantinha as massas afastadas para evitar que se aproximassem e sua introdução contribuiu para se "consultar os alfarrábios" a fim de obter respostas "certas": um Universo estático.

Dois anos mais tarde o físico holandês W. de Sitter (1872-1934), com quem Einstein mantivera intensa correspondência, obteve uma solução das equações de campo para um Universo desprovido de matéria (uma situação dificilmente real) o qual possuía a propriedade seguinte: se partículas a serem testadas fossem colocadas nele, elas voariam para longe uma da outra com velocidade cada vez maior. Então, em 1922, o matemático russo A. Friedmann (1888-1925) obteve soluções para universos cheios de matéria em expansão. Os três modelos básicos de Friedmann ainda constituem o fundamento do mais atual trabalho em cosmologia: de acordo com esses modelos o Universo originou-se em uma singularidade e pode ser "aberto", "chato" ou "fechado". O Universo aberto é aquele que se expandirá sem limites e onde o espaço e o tempo apresentam extensão infinita. O Universo fechado tem extensão finita no espaço e no tempo, expande-se até uma dimensão finita e entra novamente em colapso até voltar à singularidade. Entre estas duas possibilidades acha-se o Universo horizontal, que também se expande sem limite mas no qual o índice de expansão de seus constituintes tende para zero no futuro infinito. Como veremos rapidamente, as observações realizadas neste século são coerentes com os modelos de Friedmann e implicam que o Universo está se expandindo a partir de uma singularidade inicial.

Virtualmente todos os modelos cosmológicos teóricos incorporam o *Princípio Cosmológico*, segundo o qual o Universo é *homogêneo* e *isotrópico*. O termo "homogêneo" significa que, onde quer que você esteja localizado no Universo, sua aparência em grande escala será a mesma; e o termo "isotrópico" significa que o Universo parece o mesmo em qualquer direção. Todas as provas obtidas a partir de observações concretas sugerem que essas condições são aplicáveis. Além disso

temos que admitir que as propriedades da matéria e da energia, sob as leis básicas da natureza, são as mesmas em toda parte; também aqui todos os indícios até agora favorecem esta hipótese. Se não pudéssemos fazer essas suposições, seria virtualmente impossível construir um modelo da estrutura e do comportamento global do Universo.

Os modelos cosmológicos tratam o Universo como possuidor de densidade uniforme, isto é, como se toda a matéria das estrelas e das galáxias estivesse dispersa ao invés de achar-se concentrada em aglomerações. Em grande escala, trata-se de uma boa aproximação. Na verdade, a isotropia e a uniformidade que observamos no Universo traz problemas para os teóricos que desejam explicar a existência das galáxias; como pode o Universo ser tão "macio" e ainda assim ter dado origem às flutuações de densidade que correspondem às galáxias e aglomerados estelares?

A lei de Hubble

APÓS A DESCOBERTA de M. Humason (1891-1972) de que certo número de galáxias apresentava desvios para o vermelho em seus espectros que – interpretados nos termos do efeito Doppler – implicavam que as mesmas estavam se afastando de nós, Hubble investigou mais galáxias e descobriu em 1929 que seus desvios para o vermelho eram proporcionais a suas distâncias. Investigações subseqüentes envolvendo distâncias cada vez maiores demonstraram a validade da *lei de Hubble*, segundo a qual todas as galáxias (além das nossas vizinhas imediatas que constituem o Grupo Local) estão se afastando de nós com velocidades diretamente proporcionais a suas distâncias (Fig. 43). Podemos expressar esta lei como $V = H_0 \times D$, onde H_0 é o valor presente de um número conhecido como *constante de Hubble.* A velocidade, neste caso, geralmente é expressada em quilômetros por segundo (km/seg) e a distância em megaparsec (Mpc); um megaparsec é um milhão de parsecs* ou cerca de 3.260.000 anos-luz. A constante de Hubble é notoriamente difícil de medir, tendo diferentes métodos de determinação fornecido diferentes resultados. Os valores citados na literatura atual variam de cerca de 40 km/seg/Mpc até cerca de 110 km/seg/Mpc, mas o valor mais comumente aceito é de 55 km/seg/Mpc. Isto implica que uma galáxia a

* Um *parsec* é uma unidade de distância baseada no método de paralaxe e utilizada pelos astrônomos para estabelecer distâncias estelares relativamente pequenas: 1 parsec = 3,26 anos-luz.

uma distância de 1 megaparsec está se afastando de nós com uma velocidade de 55 km/seg; pela lei de Hubble, uma galáxia 10 vezes mais longe estará se afastando a 550 km/seg e assim por diante.

Esta surpreendente e fundamental lei baseada na observação constitui a base da nossa visão atual do Universo. As observações de Hubble demonstraram que o Universo, como um todo, está se expandindo e que não havia necessidade de qualquer "termo cosmológico" a ser adicionado às equações de Einstein para impedir as galáxias de se aglomerarem.

Velocidade de recessão (V)

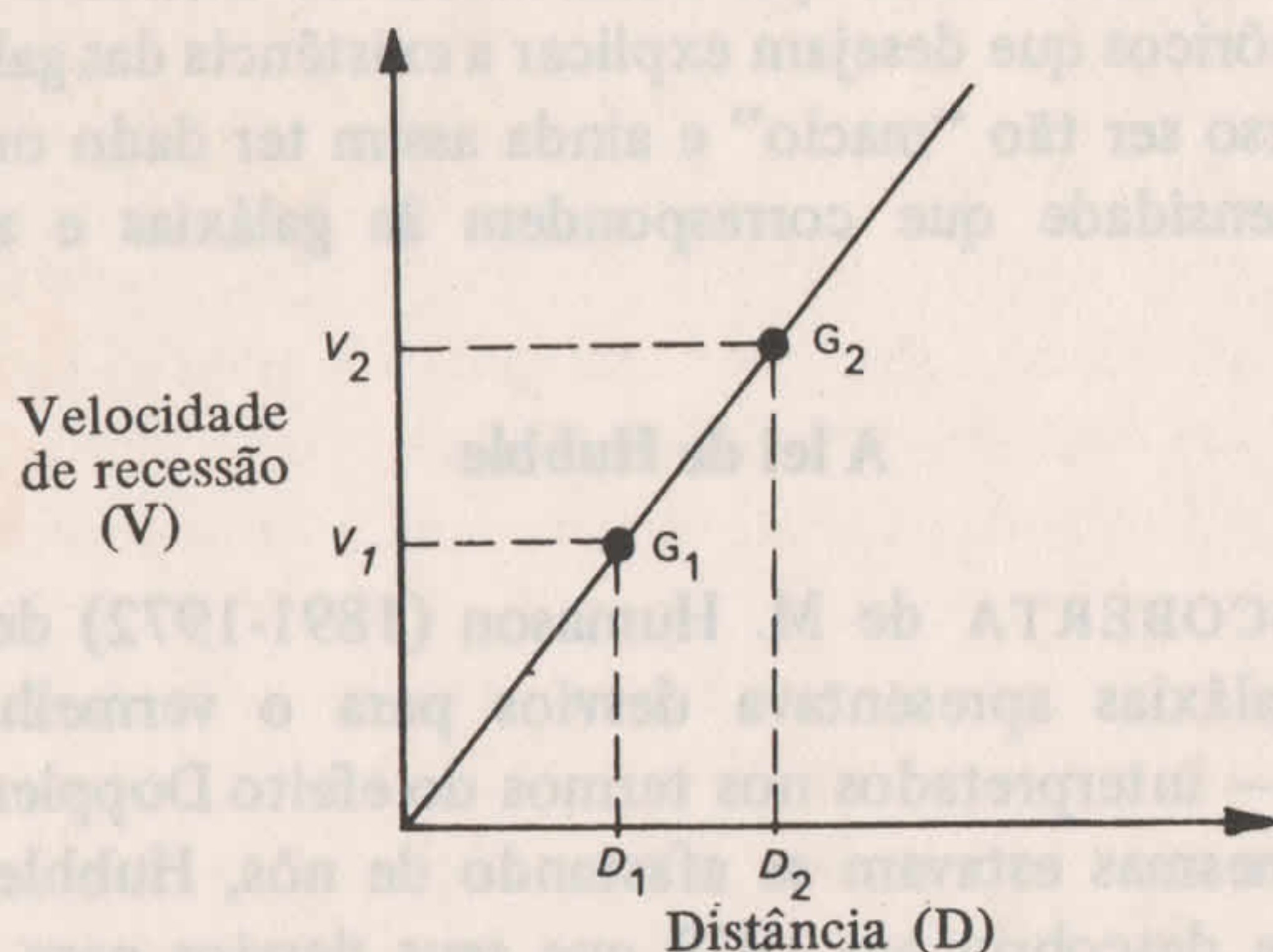
V_2 G_2 V_1 G_1 D_1 D_2

Distância (D)

Fig. 43 A lei de Hubble. *As velocidades com que as galáxias estão se afastando são diretamente proporcionais a suas distâncias. Por exemplo, a galáxia G_2 acha-se a duas vezes a distância da galáxia G_1 e está se afastando com uma velocidade duas vezes maior. A inclinação da linha dá a relação entre a velocidade e a distância e é igual à constante de Hubble: isto é,* $V/D = H_O$.

A expansão do Universo elimina o Paradoxo de Olbers. Quanto mais distante a galáxia, mais depressa está se afastando e maior o seu desvio para o vermelho no espectro. O efeito de um forte desvio para o vermelho é enfraquecer a radiação de uma fonte: além de uma certa distância o desvio para o vermelho é tão grande que nos impede de ver qualquer coisa. A lei de Hubble – simplesmente interpretada – implica que existe um limite pelo menos no que se refere ao Universo *observável*. Na linguagem da Relatividade Geral diríamos que o desvio para o vermelho impõe um "horizonte" além do qual não podemos ver. Se não

podemos receber luz de objetos além de uma certa distância, não há qualquer problema quanto ao fato do céu ser escuro à noite.

O Universo tem um centro?

À PRIMEIRA vista a lei de Hubble parece indicar que nos achamos em uma posição privilegiada – no centro da expansão universal. Tudo mais no Universo parece estar se afastando de nós. Devemos suspeitar muito de qualquer observação que sugira que ocupamos uma posição especial no esquema das coisas: todas as vezes que nos colocamos em uma posição de particular significado fomos forçados a admitir o erro desse ponto de vista. Seja lá como for, se a Terra estivesse no centro do Universo, isto violaria o Princípio Cosmológico, pois o Universo não poderia certamente parecer o mesmo a partir de cada ponto dentro dele.

De fato, as observações indicam que o Universo inteiro está se expandindo e que cada galáxia está se afastando de todas as outras galáxias. A escala do Universo está aumentando, a separação entre os pontos que o constituem está se tornando maior, mas nenhuma galáxia pode proclamar-se como o verdadeiro centro dessa expansão. Não importa em qual galáxia você esteja localizado: verá sempre o mesmo quadro – todas as outras galáxias parecerão estar se afastando de você de acordo com a lei de Hubble. É fácil visualizar isto considerando um colar de galáxias localizadas em linha reta e separadas umas das outras

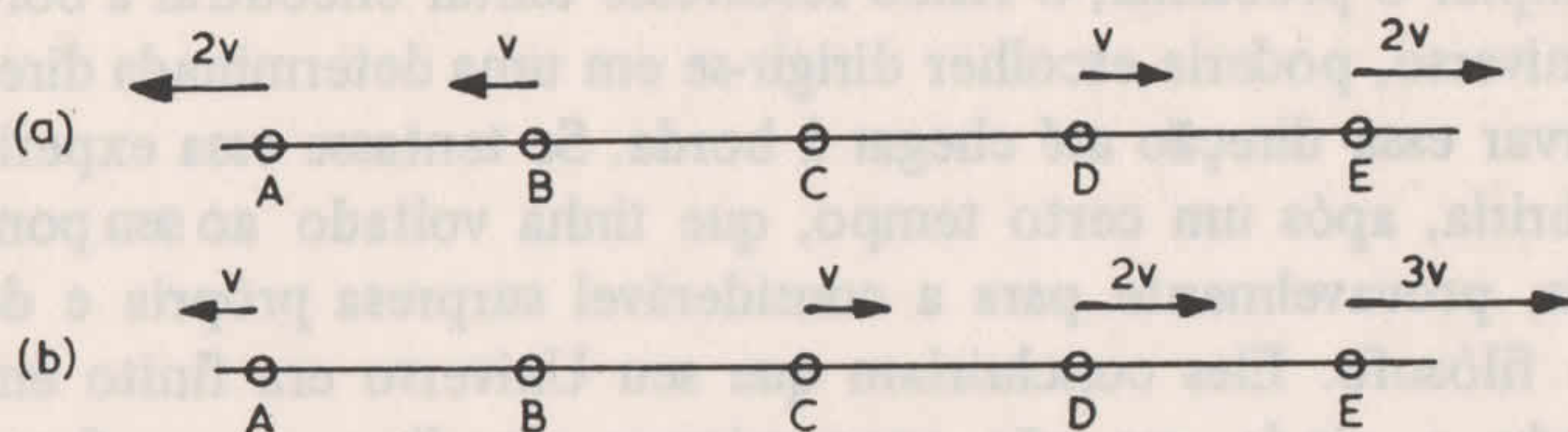



Fig. 44 Velocidades relativas das galáxias em expansão. *Imagine um colar de galáxias espaçadas igualmente ao longo de uma linha e separando-se de acordo com a lei de Hubble.* (a) *Do ponto de vista de um observador na galáxia C, B e D estão se afastando dele em direções opostas com a velocidade* v. (b) *No que se refere a um observador na galáxia B, C está se afastando* dele *com a velocidade* v, *A está se afastando em direção oposta com a velocidade v, D está se afastando com a velocidade* v, *e assim por diante. Cada um deles tem impressão de que é o centro da expansão.*

com velocidades proporcionais a suas distâncias (Fig. 44), embora, obviamente, achemos menos fácil visualizar em três dimensões.

O Universo pode não ter um "centro"; também pode não ter uma "borda". A Relatividade geral permite a possibilidade de um Universo que é finito embora ilimitado, isto é, um Universo que contém um volume finito de espaço embora sem qualquer borda discernível. O efeito global de toda a matéria contida no Universo pode ser curvar o espaço (ou, estritamente, o espaço-tempo) em um sistema fechado de tal forma que, em princípio, um raio de luz partindo em uma direção finalmente retornaria ao ponto de partida sem ter encontrado um limite para o Universo.* A melhor analogia para o Universo fechado é imaginá-lo como a *superfície* de um balão. Sabemos que o espaço possui três dimensões (comprimento, altura e largura) mas temos de imaginar todo o espaço desenhado sobre a superfície do balão e temos de aceitar que o interior e o exterior do balão não possuem significado para nós – não podemos abandonar a superfície do balão ou penetrar nele.

Imaginemos, agora, duas criaturas planas, bidimensionais, que vivem na superfície desse balão esférico (encontramos tais criaturas no Capítulo 5). Por serem bidimensionais, essas criaturas não possuem a concepção da direção vertical. Se uma fosse um físico experimental e a outra um filósofo, e ambas tivessem realizado mensurações de uma pequena área da esfera, concluiriam que seu mundo era plano. Poderiam debater a questão da infinitude ou finitude de seu Universo: quais seriam suas dimensões? Possuiriam uma borda? Se, deixando o filósofo contemplar o problema, o físico resolvesse tentar encontrar a borda de seu Universo, poderia escolher dirigir-se em uma determinada direção e conservar essa direção até chegar à borda. Se tentasse essa experiência descobriria, após um certo tempo, que tinha voltado ao seu ponto de partida, provavelmente para a considerável surpresa própria e de seu amigo filósofo. Eles concluiriam que seu Universo era finito embora ilimitado e, ainda que não conseguissem *visualizar* uma esfera, não obstante poderiam realizar mensurações sobre a superfície que lhes permitiriam descobrir que seu Universo possuía a geometria de um conceito matemático abstrato – o qual nós, como criaturas tridimensionais externas, chamamos esfera.

* Embora, de fato, a expansão e o desvio para o vermelho impedissem um fóton circunavegante de retornar a sua fonte.

Nossa própria situação pode ser similar, uma vez que podemos viver em um Universo possuidor de uma geometria fechada. Não podemos visualizar a forma do nosso Universo, mas podemos fazer observações de galáxias distantes e outros fenômenos que podem nos permitir um dia determinar a geometria do nosso Universo, seja ele aberto, plano ou fechado. No momento, contudo, nossas observações são insuficientes para resolver a questão.

Representemos nosso Universo como a superfície de um balão esférico e as galáxias como pontos sobre esta superfície (Fig. 45). À medida que enchemos o balão, a separação entre os pontos (galáxias) aumenta na proporção do raio ou do "fator escala" do balão e cada ponto "vê" os outros se afastando com uma velocidade proporcional à distância. Nenhum ponto pode proclamar-se o centro de tal universo, pois cada observador vê o mesmo quadro geral, de acordo com o Princípio Cosmológico. Recuando no tempo e portanto na história do balão em expansão veremos que em algum momento do passado seu raio deve deter ter sido zero e todos os pontos em sua superfície deveriam coalescer em um só ponto (isto não é verdade no que se refere aos balões reais, mas parece ser verdade em se tratando de universos reais). De certa maneira, todo o ponto sobre a superfície pode proclamar igualmente *ter sido* o centro!

Se admitirmos que o Universo teve uma singularidade em seu passado – isto é, que tudo que nele existe originou-se há um tempo finito no evento que foi denominado a Grande Explosão e vem se afastando desde então como conseqüência deste violento acontecimento inicial – então a analogia do balão ajuda a tornar claro um aspecto crucial da imagem criada pela Relatividade Geral desse Universo. O conteúdo material do Universo não irrompeu de um "átomo primevo" hiperdenso (como o abade Lemaître (1894-1966) sugeriu no início da década de 30) em um espaço-tempo preexistente; a matéria não surgiu subitamente para preencher um espaço previamente vazio. Em vez disso, *o espaço e o tempo se originaram* com a Grande Explosão. Nem o tempo nem o espaço, no sentido em que usamos estes termos, existiam "antes" desse evento inicial. A pergunta "que aconteceu antes da Grande Explosão?" não tem significado.

De acordo com este ponto de vista, as galáxias não estão se afastando "através" do espaço. Tal como os pontos na superfície do balão, estão sendo afastadas pela expansão do próprio espaço; na verdade, podemos encarar as galáxias como se estivessem em repouso em um

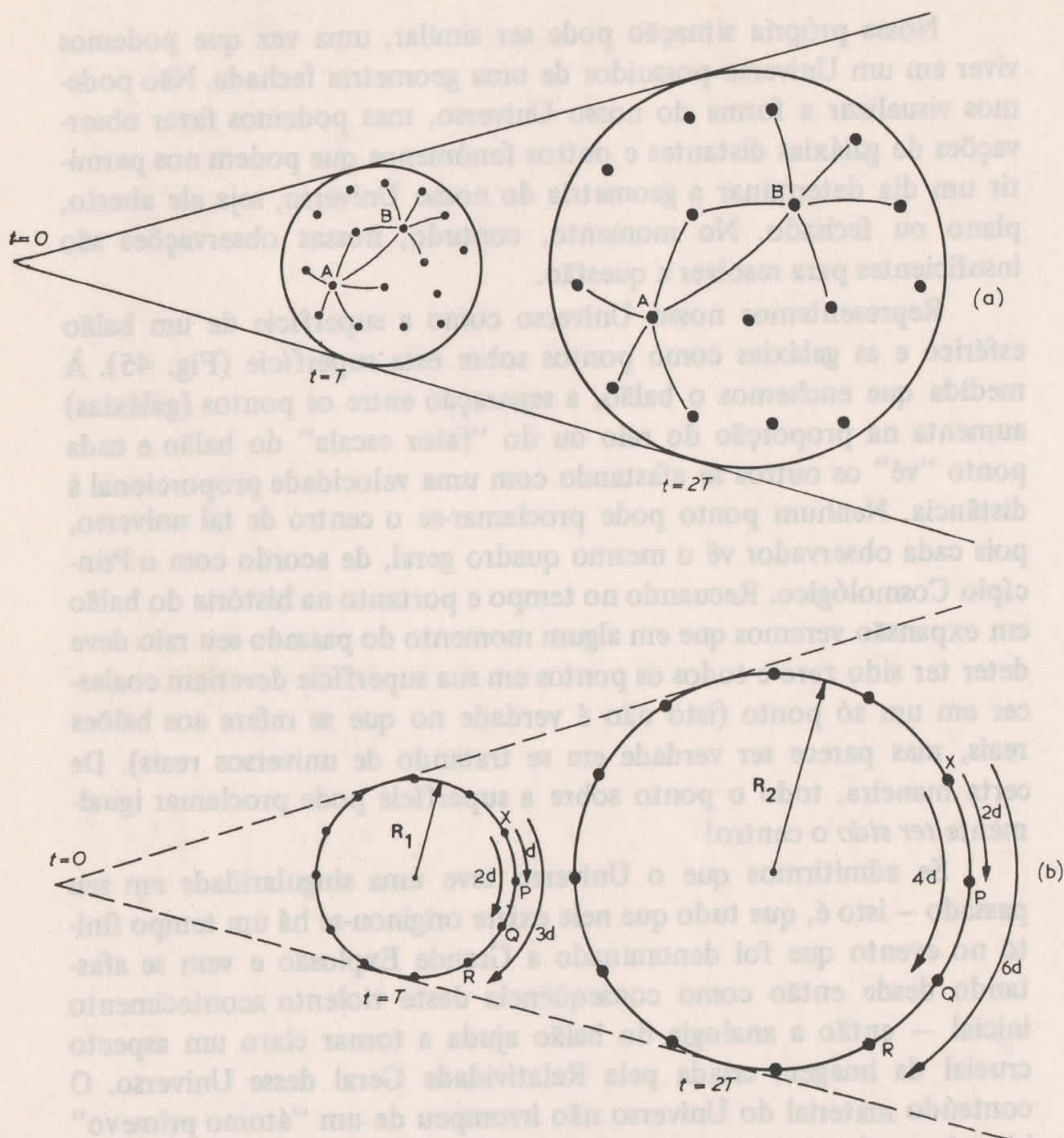



Fig. 45 O Universo em expansão – a analogia do balão. *Imagine que as galáxias sejam pontos sobre a superfície de um balão em expansão.* (a) *Quando o balão duplica de tamanho entre os tempos* t = T e t = 2T *o padrão de distribuição dos pontos permanece o mesmo, mas as distâncias entre eles aumentam de um fator 2. Um observador na galáxia A observa que todas as outras galáxias estão se afastando dele; um observador na galáxia B, ou em qualquer outra galáxia, verá a mesma imagem. Nenhum pode afirmar que é o centro da expansão, embora se olharmos de volta para o tempo zero, quando o balão possuía raio zero, então todas as "galáxias" estavam no mesmo ponto naquele momento.*

espaço em expansão. Podemos considerar que a dispersão média de toda a matéria contida no Universo está se expandindo tal como a superfície do balão; e podemos dizer que um observador é um "observador fundamental" se ele se encontra em repouso em relação à dispersão da matéria em sua localização. Para tais observadores o Universo parece homogêneo e isotrópico. Afora movimentos menores peculiares às galáxias consideradas, tais como o movimento dentro do Grupo Local devido à influência gravitacional das galáxias em nossa vizinhança imediata, um observador residente em qualquer galáxia que compartilha da expansão geral do Universo pode proclamar-se um observador fundamental. O Universo parecerá o mesmo para todos esses observadores e será visto por eles passar através da mesma seqüência de estádios evolutivos; por causa disso é possível estabelecer uma escala cronológica geral aplicável aos eventos que envolvem o Universo e com a qual todos os observadores fundamentais concordarão – *o tempo cósmico.*

O movimento relativo aos observadores fundamentais, em suas localizações, dá origem a efeitos de contração do comprimento e de dilatação do tempo, tal como se você fosse enviado da Terra em uma espaçonave que viajasse a uma grande fração da velocidade da luz: você não poderia ver um Universo isotrópico; algumas das galáxias em seu hemisfério dianteiro de visão apresentariam desvio para o azul.

A idade do Universo

SE NOSSA imagem simples da Grande Explosão está correta, deveria ser possível, conhecendo as velocidades das galáxias e suas distâncias, deduzir quando elas, juntamente com nossa galáxia, se achavam compri-

(b) *Olhando para o balão em seção transversal vemos como a escala do balão, indicada pelo seu raio, muda entre os tempos* t = T *e* t = 2T. R_2 *é duas vezes o tamanho de* R_1. *Se considerarmos uma cadeia de galáxias igualmente espaçadas ao redor da circunferência do balão podemos ver como a lei de Hubble é obedecida. Do ponto de vista de X, a distância da galáxia P aumenta de* d *para* 2d, *isto é, de uma unidade de distância,* d. *Sua "velocidade de recessão" é a alteração na distância dividida pelo tempo que transcorreu, isto é,* d/T. *A galáxia Q moveu-se de* 2d *para* 4d, *aumentando sua distância de* 2d. *Sua velocidade de recessão é de* 2d/T, *isto é, duas vezes maior do que a da galáxia* P. *Da mesma forma, a "velocidade" de R é três vezes maior do que a de P.*

midas na singularidade inicial.* A mais simples abordagem consiste em admitir que as galáxias se afastaram uma da outra com velocidades constantes desde o evento inicial (podemos encarar as galáxias mais distantes como as que atingiram maiores velocidades). Para qualquer galáxia a uma distância D de nossa galáxia, movendo-se com a velocidade V, o tempo necessário para atingir sua distância atual é simplesmente D dividido por V: D/V. Pela lei de Hubble a velocidade e a distância de qualquer galáxia estão relacionadas pela fórmula $V = H_0 \times D$ e a partir desta vemos que o tempo necessário para qualquer galáxia atingir sua distância atual é $D/V = 1/H_0$. Todas as galáxias devem ter levado precisamente o mesmo tempo para atingir suas distâncias atuais, com as mais distantes movendo-se mais depressa, de acordo com a lei de Hubble, na proporção exata para atingir isso. Um observador em qualquer outra galáxia chegaria à mesma conclusão com base em suas observações dos movimentos das outras galáxias relativas a ele.

Utilizando o valor $H_0 = 55$ km/seg/Mpc encontramos que a "idade do Universo", o tempo transcorrido desde a Grande Explosão, é cerca de 18 bilhões de anos (Fig. 46). Este valor seria correto somente se não houvesse nenhuma matéria no Universo, pois o efeito das atrações gravitacionais recíprocas entre as galáxias seria retardar seu índice de recessão. É razoável supor, portanto, que as galáxias estavam se separando mais rapidamente no passado do que no presente e deduzir que a idade do Universo deveria ser menor do que o valor a que chegamos acima. O modelo horizontal que Friedmann propôs para o Universo, o qual é capaz de se expandir até o infinito, teria uma idade de 12 bilhões de anos, enquanto sendo o Universo fechado, destinado a implodir novamente, sua idade seria menor do que este valor. Para um Universo aberto e sempre em expansão, a idade estaria entre 12 a 18 bilhões de anos.

As medidas originais de Hubble forneceram um valor de H_0 em torno de 550 km/seg/Mpc, cerca de 10 vezes maior do que o valor aceito atualmente. As distâncias baseadas nesse valor seriam 10 vezes menores do que as distâncias atualmente calculadas (uma distância pode ser atribuída a uma galáxia, admitindo que a lei de Hubble funcione

* Evidentemente, as galáxias não poderiam ter assumido suas formas presentes a menos após considerável tempo decorrido depois da Grande Explosão, mas o material das quais elas são constituídas estava presente – embora sob forma bastante diferente naquela ocasião.

Escala do Universo

Aberto

Horizontal (expansão contínua)

Expansão contínua (matéria zero = densidade)

Fechado

Tempo

Aberto Fechado

Grande Compressão

$2/3\ t_H$

t_H

Passado Presente Futuro

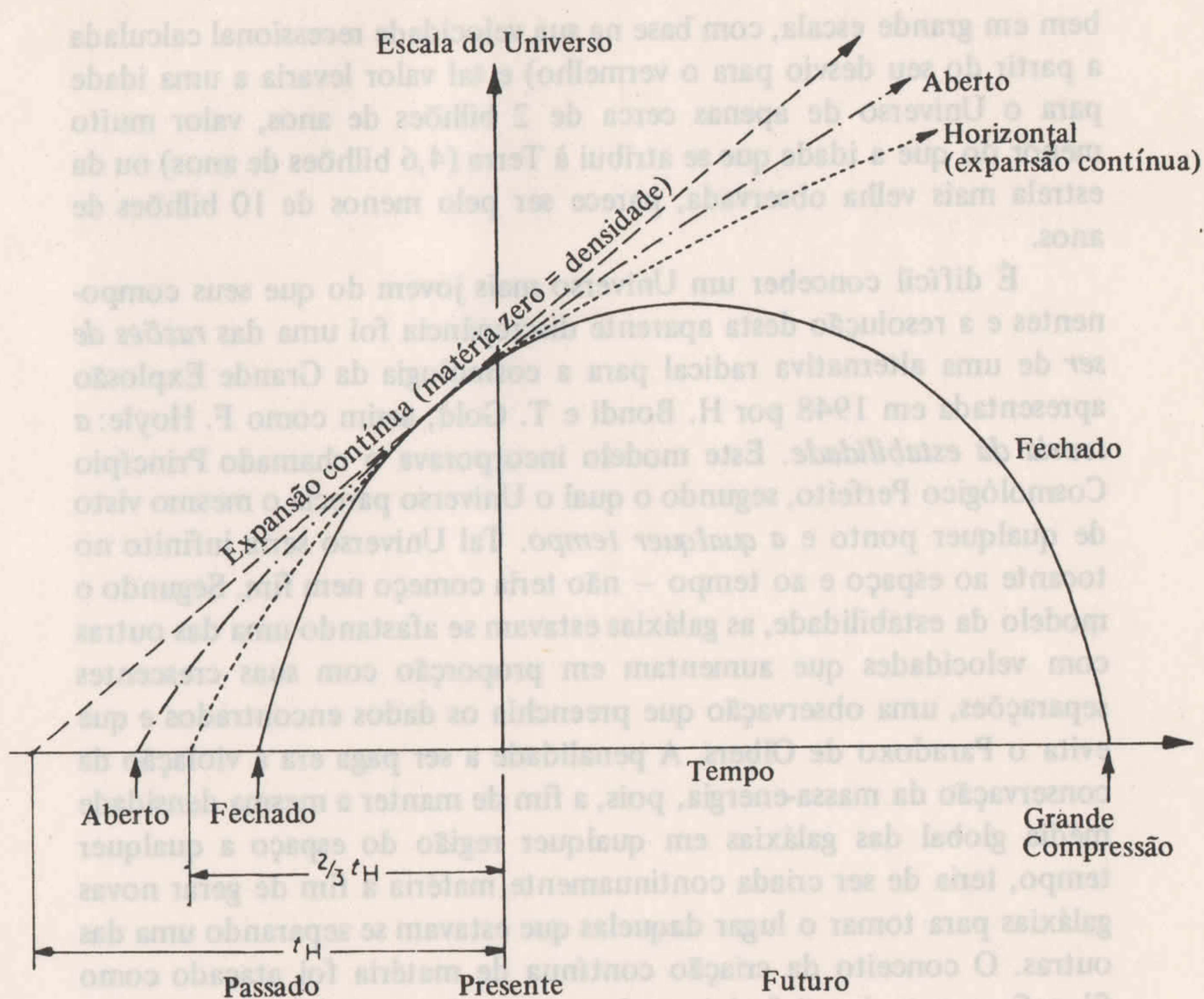



Fig. 46 A idade do Universo – modelos da Grande Explosão segundo Friedmann. *Se o Universo está se expandindo em velocidade constante, seu "raio" deve ter sido zero em um tempo finito no passado; o intervalo entre esse tempo e o presente é conhecido como o tempo de Hubble* (t_H) *e, admitindo que o valor da constante de Hubble referido no texto é cerca de 18 bilhões de anos. Entretanto, a matéria está presente no Universo: assim sendo, a expansão deve estar diminuindo e assim a Idade de Hubble provavelmente constitui um limite superior. Se o Universo tem precisamente a densidade crítica, ele* simplismente *se expandirá sem limites (isto é, a velocidade de expansão sempre diminuirá, mas nunca chegará a zero) e a idade presente será 2/3* t_H *(cerca de 12 bilhões de anos). Um Universo fechado será mais jovem do que esta idade; enquanto um Universo aberto terá uma idade entre* t_H *e 2/3* t_H.

bem em grande escala, com base na sua velocidade recessional calculada a partir do seu desvio para o vermelho) e tal valor levaria a uma idade para o Universo de apenas cerca de 2 bilhões de anos, valor muito menor do que a idade que se atribui à Terra (4,6 bilhões de anos) ou da estrela mais velha observada, parece ser pelo menos de 10 bilhões de anos.

É difícil conceber um Universo mais jovem do que seus componentes e a resolução desta aparente discrepância foi uma das *razões de ser* de uma alternativa radical para a cosmologia da Grande Explosão apresentada em 1948 por H. Bondi e T. Gold, assim como F. Hoyle: *a teoria da estabilidade*. Este modelo incorporava o chamado Princípio Cosmológico Perfeito, segundo o qual o Universo parecia o mesmo visto de qualquer ponto e *a qualquer tempo.* Tal Universo seria infinito no tocante ao espaço e ao tempo – não teria começo nem fim. Segundo o modelo da estabilidade, as galáxias estavam se afastando uma das outras com velocidades que aumentam em proporção com suas crescentes separações, uma observação que preenchia os dados encontrados e que evita o Paradoxo de Olbers. A penalidade a ser paga era a violação da conservação da massa-energia, pois, a fim de manter a mesma densidade média global das galáxias em qualquer região do espaço a qualquer tempo, teria de ser criada continuamente matéria a fim de gerar novas galáxias para tomar o lugar daquelas que estavam se separando uma das outras. O conceito da criação contínua de matéria foi atacado como filosoficamente insatisfatório embora se pudesse afirmar que não era mais insatisfatório do que o súbito aparecimento de toda a matéria após a Grande Explosão. Testes de observação diretas não seriam possíveis, desde que a velocidade de criação necessária atingiria apenas cerca de um átomo de hidrogênio por metro cúbico por bilhão de anos.

Durante a década de 50 e no início da de 60 foi grande a polêmica entre os defensores das teorias opostas, mas em meados dos anos 60 começaram a acumular-se indícios capazes de negar a teoria da estabilidade.

Uma forma de tentar distinguir entre as teorias foi realizar contagens do número de galáxias ou fontes de rádio visíveis a distâncias cada vez maiores (ou a crescentes desvios para o vermelho). Encarando distâncias cada vez maiores, os astrônomos estão encarando um tempo cada vez mais distante: de acordo com a teoria da estabilidade a separação média das galáxias deveria ser a mesma no passado distante que é hoje, embora de acordo com a teoria da Grande Explosão as galáxias

deveriam ter estado juntas há bilhões de anos atrás. Tais diferenças deveriam acentuar-se pelo fato do número de fontes no céu aumentar à medida que contamos objetos cada vez menos brilhantes (cada vez mais distantes). Para fazer a diferença, é necessário considerar distâncias além do limite no qual as galáxias ordinárias podem ser detectadas e assim a contagem se concentrou sobre as radiogaláxias. Os resultados obtidos nesse levantamento indicaram que o número de fontes tênues aumentava muito mais depressa do que as previsões da teoria da estabilidade fariam supor.

Durante algum tempo a interpretação desses resultados foi questionada, mas ocorreu uma descoberta acidental que, mais do que qualquer outra prova, levou à derrocada da teoria da estabilidade. Ao testar uma sensível antena de comunicações em 1964, A. A. Penzias e R. Wilson, dos Laboratórios Bell, descobriram um tênue fundo de microondas que, apesar de seus melhores esforços, não conseguiam eliminar. Em 1965 eles concluíram que esse *fundo de microondas* vinha do espaço e era altamente isotrópico. Curioso como possa parecer, por volta da mesma época R. Dicke, P. G. Roll e D. T. Wilkinson, em Princeton, haviam começado a construir um sistema de antenas com a intenção específica de estudar as radiações desta espécie porque, de acordo com cálculos realizados por vários teóricos desde o trabalho pioneiro de George Gamow (1904-1968) em 1948, o Universo deveria conter um tênue fundo de microondas se tivesse realmente começado em um denso e quente estado.

Após o evento inicial, o Universo teria se transformado em uma "sopa" muito quente e densa de matéria e radiação que esfriaria à medida que se expandisse. Depois de certo tempo (cerca de 700.000 anos, de acordo com as estimativas atuais) a temperatura teria caído até uns 4.000° K, temperatura suficientenente fria para os prótons e os elétrons se reunirem a fim de constituir átomos de hidrogênio eletricamente neutros. Quando isto aconteceu, a sopa em expansão, que até então era opaca à radiação eletromagnética, ter-se-ia tornado transparente (os átomos neutros interagem com a radiação muito menos eficazmente do que as partículas carregadas) e a radiação teria seguido seu próprio caminho, espalhando-se através do Universo em expansão (Fig. 47). Quando liberada, a radiação teria o mesmo caráter da radiação de um corpo negro liberado de um corpo quente a uma temperatura entre 3.000 e 4.000° K, isto é, a radiação seria de natureza similar à emitida por uma estrela avermelhada e moderadamente fria.

A radiação liberada pela Grande Explosão se espalharia por todo o espaço e por isso seria de esperar que fosse altamente isotrópica. O

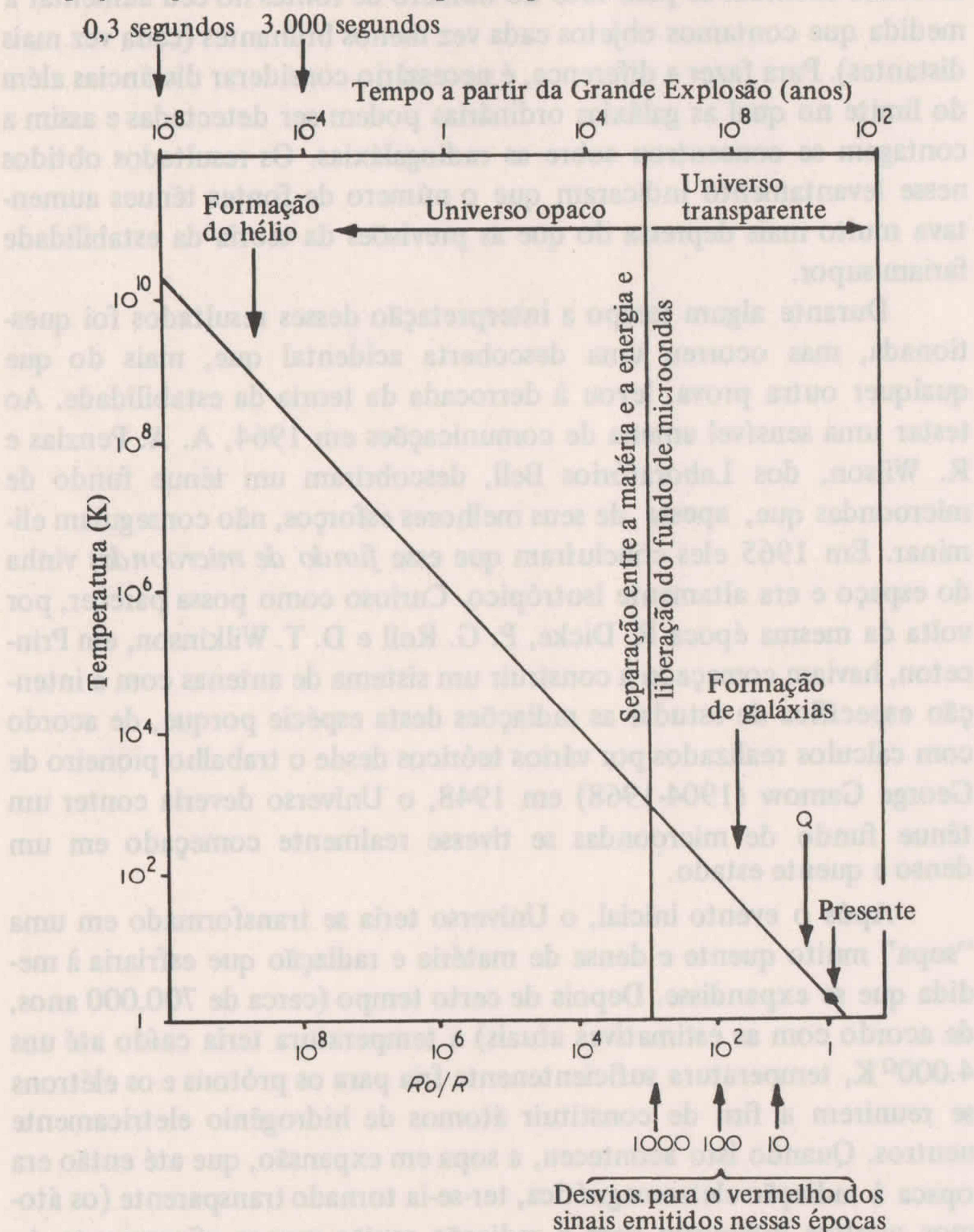



Fig. 47 História térmica do Universo. *A mutável temperatura do Universo (ou do seu conteúdo energético, pelo menos) comparada com o tempo a partir da Grande Explosão (a linha reta constitui* apenas uma aproximação*). A escala inferior mostra o valor do "raio" presente, ou fator escalar, do Universo (*R_O*) em comparação com o valor* R *em tempos mais antigos. Quando o Universo tinha cerca de 1 segundo de*

espectro e a temperatura de corpo negro observados no tocante à microonda concorda muito bem com as previsões da teoria da Grande Explosão; sua existência não foi prevista e não pode ser explicada pela teoria da estabilidade. Esta descoberta casual mostrou que a teoria da estabilidade era insustentável.

Em virtude da expansão do Universo, a radiação primordial foi intensamente desviada para o vermelho. A radiação que estamos recebendo agora foi liberada cerca de 700.000 anos depois da Grande Explosão e para remontar à era em que ela foi emitida teríamos de olhar as profundezas do espaço a uma distância correspondente a um desvio para o vermelho em torno de 1.000. Este enorme desvio para o vermelho moveu o comprimento de onda máximo da radiação primordial da extremidade vermelha do espectro visível para a região das microondas, onde se concentra a radiação de fundo hoje observada, ocorrendo em um comprimento de onda em torno de 1 mm. A temperatura efetiva desta radiação desviada para o vermelho é hoje cerca de 3º K, em comparação com seu valor original em torno de 3.000º K quando emergiu da bola de fogo em expansão na época da Grande Explosão.

Penzias e Wilson partilharam o Prêmio Nobel de 1978 de física em reconhecimento pelo significado de seu trabalho.

Outro fato favoreceu a Grande Explosão às expensas da teoria da estabilidade: o "problema do hélio". De um modo geral, em toda a parte do Universo os astrônomos verificam que a abundância relativa dos dois elementos mais leves, o hidrogênio e o hélio, é a mesma, provavel-

idade, a temperatura da matéria e da energia era cerca de 10 bilhões de graus Kelvin, isto é, 10^{10}ºK); hoje a temperatura da radiação de fundo é pouco menor do que 3ºK. Há cerca de 1.000 anos após a Grande Explosão, o Universo tornou-se transparente e a radiação de fundo foi liberada (matéria e radiação "separaram-se"). Naquele tempo o Universo tinha cerca de 1 milionésimo do seu "raio" atual e os sinais recebidos daquela era têm sido desviados para o vermelho de um fator aproximado de 1.000. O desvio para o vermelho do quasar mais distante (Q) é cerca de 3,6; não possuímos no momento observações diretas relativas ao período correspondente a desvios para o vermelho entre 1.000 e 3,6, isto é, entre cerca de 700.000 e 2 bilhões de anos após a Grande Explosão.

mente cerca de 25-30 por cento da matéria do Universo sendo constituída de hélio e a maior parte do restante de hidrogênio, o elemento mais simples de todos. O problema apresentara dois aspectos: de onde viera todo o hélio e por que achava-se distribuído de maneira tão uniforme? O hélio é produzido dentro das estrelas nas reações nucleares que as mantêm brilhando, mas apenas uma pequena proporção de estrelas se torna supernovas, dispersando seus produtos nucleares nas nuvens interestelares das quais novas gerações de estrelas nascerão. Assim, as quantidades de hélio observadas não podem ter sido produzidas dentro das estrelas, como seria necessário para sustentar a teoria da estabilidade, repousando, como ela o faz, sobre a proposição de que os átomos criados no espaço são de hidrogênio. De acordo com o modelo padronizado da Grande Explosão, as condições nos primeiros poucos minutos da expansão eram ideais para a produção de hélio nas proporções relativas nas quais o encontramos hoje. O fato de que o hélio ter-se-ia formado ao mesmo tempo teria assegurado sua distribuição uniforme hoje.

À luz dos dados disponíveis – contagens de fontes, radiação de fundo à base de microondas e do problema do hélio – não é de surpreender que no início dos anos 70 a teoria da estabilidade tenha sido abandonada e a teoria da Grande Explosão tenha assumido uma posição quase dogmática.

A história do Universo, de acordo com o modelo "padronizado" da Grande Explosão

NO MOMENTO zero o Universo emergiu de uma singularidade. Durante o primeiro milionésimo de segundo, quando a temperatura era bem além de 10^{12} K e a densidade era além da nossa compreensão, exóticas interações além do alcance da física de hoje devem ter ocorrido a uma velocidade inconcebível. Só podemos especular atualmente sobre o que ocorreu naqueles primeiros instantes; talvez, por exemplo, as quatro forças da natureza fossem apenas uma, no começo. Temos muitas razões para supor, entretanto, que ao final do primeiro milionésimo de segundo existia uma sopa primordial de partículas energéticas quentes – partículas de radiação (fótons) e partículas de matéria. A massa em interação achava-se em um estado que denominamos equilíbrio térmico.

A famosa equação de Einstein $E = mc^2$ nos diz que a matéria pode ser convertida em energia e a energia em matéria. Assim sendo, naqueles primeiros instantes todas as espécies de partículas devem ter se formado e se aniquilado. Qualquer partícula material possui uma certa quantidade de massa e assim um certo "limiar de energia" máximo é necessário para a sua formação; tão logo a densidade energética dos fótons tornou-se suficientemente grande, qualquer espécie de partícula podia ser criada. Sabemos, também, que quando os raios gama (fótons energéticos) criam partículas, elas as criam em pares compreendendo uma partícula e sua antipartícula, isto é, um elétron e um pósitron. Nas densas condições que predominavam no início do Universo, partículas e antipartículas imediatamente colidiriam de novo, formando radiação gama. Este intercâmbio entre partícula e radiação continuaria enquanto a densidade energética fosse suficientemente grande para os fótons excederem os limiares das partículas.

No tempo em que o Universo tinha apenas um centésimo de segundo de idade, a temperatura caíra ate cerca de 10^{11} °K, bem abaixo do limiar no qual os prótons e os nêutrons podiam ser criados, mas algumas dessas partículas devem ter sobrevivido ao processo de mútuo aniquilamento, pois de outra forma não haveria nenhuma matéria no Universo hoje! Depois de 1 segundo, a temperatura caíra até cerca de 10^{10} °K e os neutrinos haviam cessado de interagir significativamente com a matéria; com efeito, o Universo tornou-se transparente aos neutrinos. Os elétrons e os pósitrons ainda estavam se aniquilando e reformando, mas após 10 segundos mais ou menos o nível de energia caíra abaixo de seu limiar, também, e a grande maioria dos pósitrons e dos elétrons chocavam-se uns com os outros em uma orgia de destruição, deixando atrás de si apenas um pequeno resíduo de elétrons, capazes por fim de unir-se aos prótons e aos nêutrons para dar origem ao conteúdo material do Universo como conhecemos hoje.

Deve ter havido um ligeiro equilíbrio entre as partículas materiais (fótons, nêutrons, elétrons etc.) e as partículas antimateriais (antiprótons, antinêutrons, pósitrons), uma vez que de outra forma todas as partículas "materiais" teriam sido destruídas. Em nossa parte do Universo, a matéria existe em quantidade esmagadoramente maior do que a antimatéria, que só é encontrada sob a forma de partículas isoladas. É possível, naturalmente, que naqueles primeiros instantes o Universo possuísse regiões onde a matéria comum predominava e regiões onde a antimatéria predominava, caso em que podem existir estrelas e galáxias

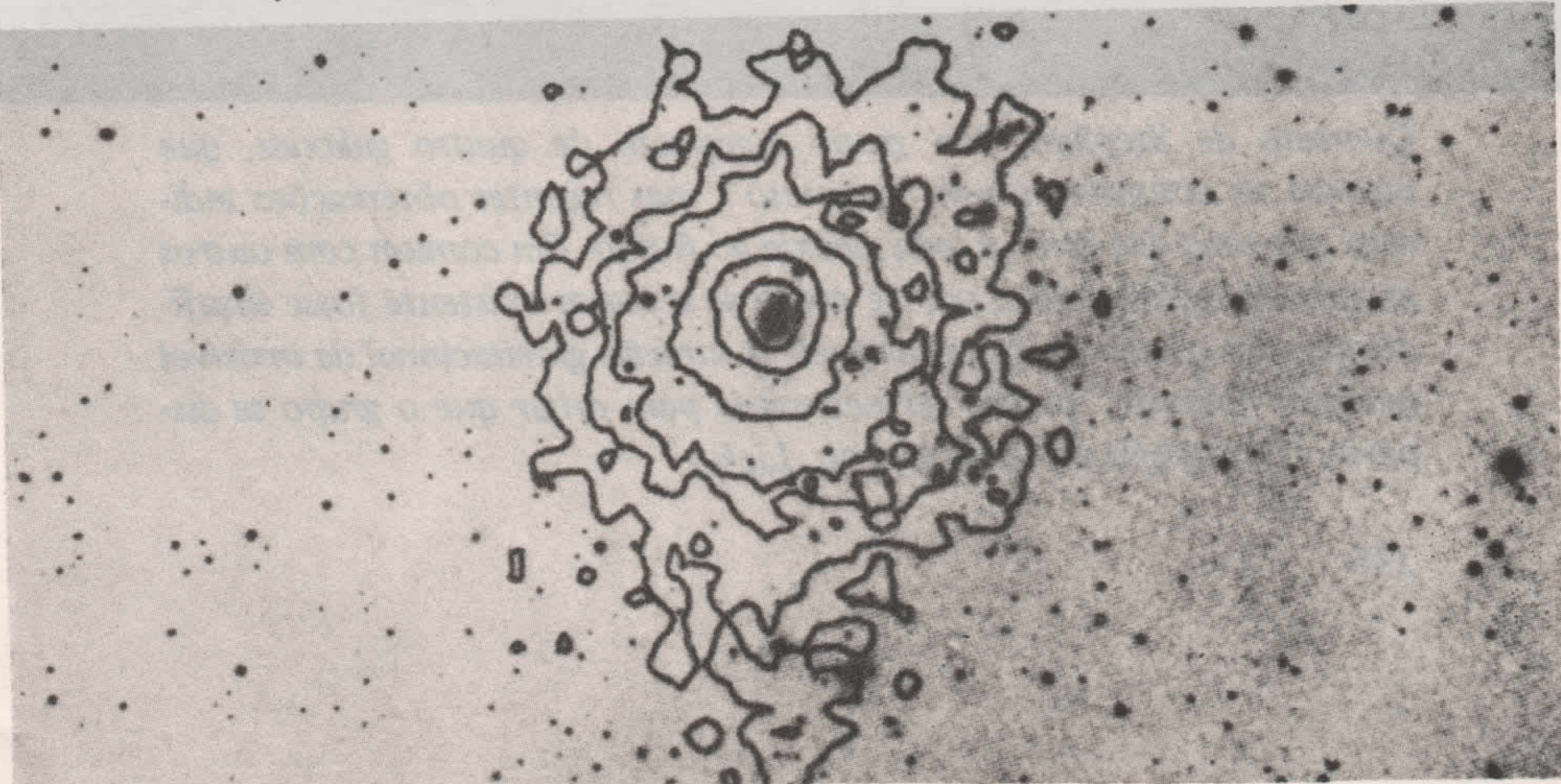
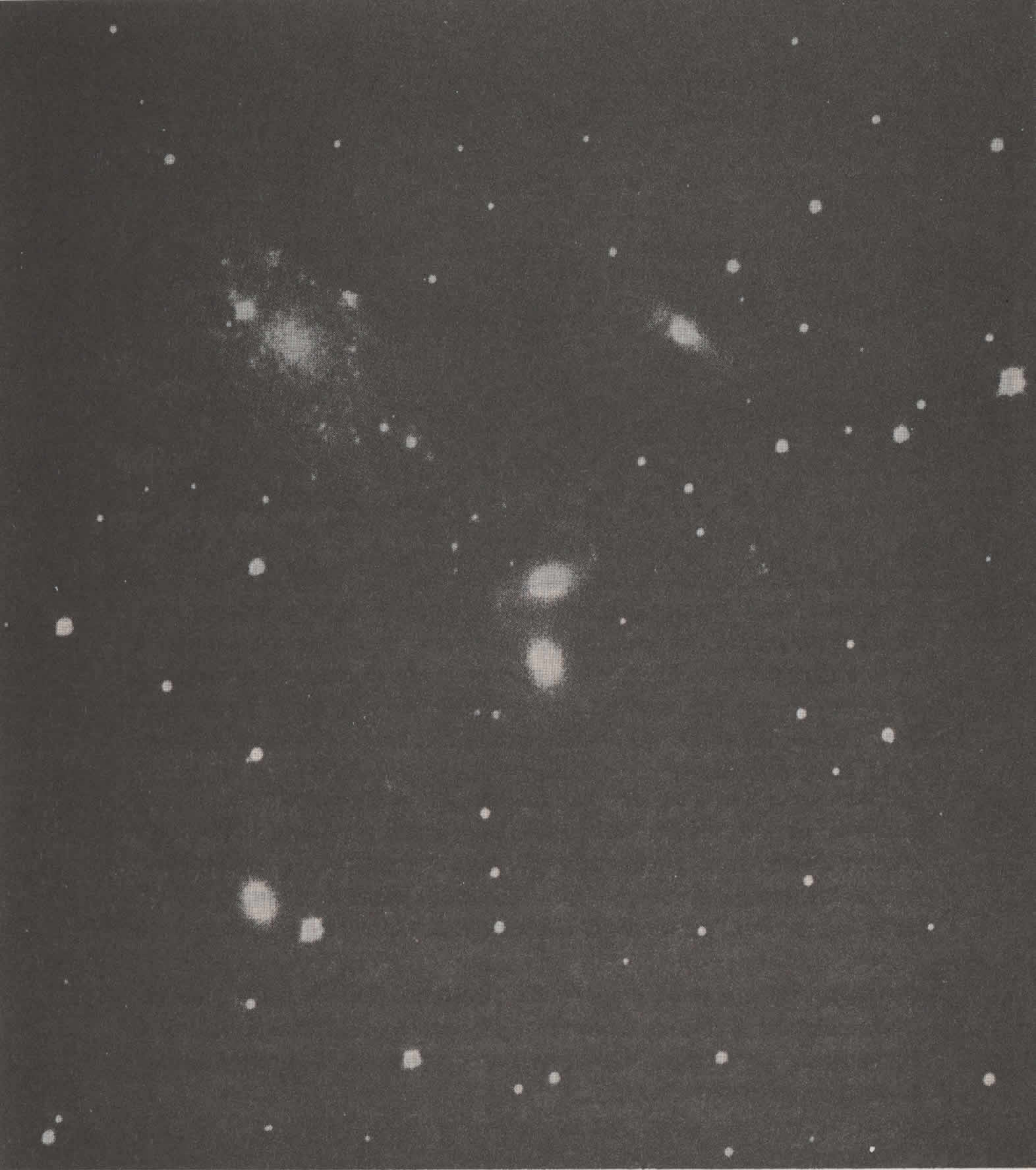
de antimatéria; a certa distância elas não poderiam ser distinguidas das estrelas e das galáxias constituídas de matéria comum. Entretanto, não existem provas aceitas por todos para apoiar tal afirmação e é mais razoável admitir que houve um equilíbrio global pequeno porém significativo. Na verdade, existem teorias em desenvolvimento hoje (Grandes Teorias Unificadas – veja Capítulo 12) segundo as quais esse equilíbrio parece ter surgido naturalmente.

Quando o Universo tinha cerca de 3 minutos de idade, a temperatura caíra até cerca de 10^9 °K e as condições eram propícias à formação de hélio, sendo praticamente todos os nêutrons disponíveis mobilizados por este processo. Cerca de um minuto mais tarde, o conteúdo material do Universo consistia quase inteiramente de núcleos de hidrogênio e hélio em proporções muito aproximadas das que observamos hoje. Em seguida a expansão da sopa primordial continuou com muito poucas interações até que, depois de cerca de 700.000 anos, os elétrons e os prótons estavam prontos para se combinar a fim de formar átomos neutros de hidrogênio, o Universo tornou-se transparente à radiação e aquilo que hoje observamos como o fundo de radiação constituída de microondas foi liberado.

Quando a matéria se tornou transparente à radiação, a gravidade surgiu, dominando as interações entre as massas praticamente neutras de matéria que constituíam o volume material do Universo. A gravidade fez com que as galáxias, os aglomerados estelares, as estrelas e os planetas se formassem a partir do material primordial liberado da bola de fogo que rapidamente se dissipava e esfriava, assim como a gravidade determinará a evolução e o destino do próprio Universo. Entretanto, existem muitas perguntas sem respostas relativas à era que se seguiu à separação entre a matéria e a radiação, da mesma forma no que se refere à formação das galáxias e das estrelas. As galáxias se formaram antes das primeiras gerações de estrelas ou *vice-versa*? Como foi que a matéria conseguiu se formar em discretas bolhas – estrelas, agrupamentos de galáxias e superaglomerados – enquanto o Universo como um todo estava se expandindo?

Existem duas correntes básicas de pensamento a respeito da maneira como se formaram as galáxias. Um ponto de vista é que em determinado momento teria existido, ao acaso, regiões de densidade maior que a média dentro da mistura de matéria e energia em expansão; devido aos efeitos da gravidade sobre essas regiões, ali se formariam a princípio grandes bolhas, dentro das quais ocorreria a fragmentação, produ-

O aglomerado Coma de galáxias. Um aglomerado de galáxias com cerca de 16 milhões de diâmetro e localizado a uma distância em torno de 350 milhões de anos-luz, este particular aglomerado tem interesse especial pelo fato de ser uma fonte de raios X. A radiação X parece ser emitida por gás quente (a uma tempeartura acima de alguns milhões ou dezenas de milhões de graus Kelvin), que se considera penetrar todo o aglomerado. Entretanto, mesmo levando em consideração esse gás e o número total de galáxias visíveis, não parece existir massa bastante para manter estável esse agloemrado. A "massa faltante" necessária pode existir sob muitas formas; os buracos negros contituem uma possibilidade que vem sendo discutida. (Fotografia do Observatório Lick.)

O aglomerado de galáxias Abell 85, mostrando a distribuição de gás emissor de rios X contido dentro da aglomeração. (Cortesia de C. Jones-Forman, High Energy Astrophysics Division, Harvard/Smithsonian Center for Astrophysics.)

Quarteto de Stephan. Um grupo compacto de quatro galáxias, que outrora se considerava um "quinteto", mas recentes observações indicam que uma das cinco é uma galáxia ao fundo. Em comum com outros grupos de aglomerados, parece como se a massa existente fosse insuficiente para manter o grupo estável. A atração gravitacional da invisível matéria "faltante" parece ser necessária para evitar que o grupo se disperse. (Fotografia do Observatório Lick.)

zindo entidades menores que se tornaram os aglomerados estelares e as galáxias isoladas que vemos hoje. Em seguida, dentro dessas galáxias, teve lugar a formação das estrelas, novamente como resultado da gravidade atuando sobre regiões de densidade localmente aumentada (veja Capítulo 6). Um outro ponto de vista envolve uma ordem diferente de eventos: a princípio muitas pequenas galáxias se formaram a partir de flutuações na densidade da matéria contida na sopa em expansão e à medida que o tempo passava elas se reuniram em aglomerados, superaglomerados e talvez mesmo maiores agrupamentos hierárquicos.

Em relação a este debate é crucial a questão de até que ponto foi turbulento ou suave a Grande Explosão. O Universo hoje parece notavelmente suave em grande escala: embora existam algumas irregularidades, a distribuição das galáxias distantes e dos aglomerados estelares é altamente uniforme, considerando o céu como um todo, enquanto a radiação de fundo é isotrópica a mais de uma parte para cada 3.000. Diante disto, estes fatos parecem implicar que a própria Grande Explosão foi um estado de expansão notavelmente suave e bem ordenado; mas, neste caso, como teriam surgido as flutuações de densidade necessárias para a formação das galáxias? Nossa dificuldade atualmente é que não possuímos dados observacionais relativos ao período crucial da formação da galáxia. De acordo com o ponto de vista convencional, o fundo de microondas nos informa a respeito do tempo em que o Universo só tinha 700.000 anos de idade, correspondendo a um desvio para o vermelho em torno de 1.000; o mais distante quasar até agora observado apresenta um desvio para o vermelho de 3,6, o que implica que a luz que estamos recebendo dele foi emitida quando o Universo tinha menos de 2 bilhões de anos de idade. Entre essas duas épocas, muita coisa deve ter acontecido – inclusive a formação de galáxias. Não obstante, os dados disponíveis até o momento tendem a favorecer a segunda hipótese mencionada acima, segundo a qual as galáxias formaram-se primeiro e em seguida reuniram-se em aglomerados e superaglomerados.

Em virtude do sucesso do modelo da Grande Explosão, há uma tendência a admitir que a radiação de microondas de fundo realmente represente a radiação liberada a partir da bola de fogo em expansão quando o Universo tornou-se transparente. Talvez seja um ponto de vista demasiado simplório. Em 1978, em uma tentativa para explicar o fato de que a relação observada entre fótons e bárions (partículas "pesadas", tais como os prótons e os nêutrons) é cerca de 10^8:1, M. Rees sugeriu que a radiação de fundo observada poderia ser explica-

da se tivesse havido um surto maciço de formação de estrelas logo após a "multiplicação" e antes de Universo ter 1 milhão de anos. Tais estrelas teriam vivido no máximo cerca de 10 milhões de anos e muitas explodiriam como supernovas e liberariam elementos pesados alguns dos quais se condensariam para formar partículas sólidas, produzindo nuvens de poeira. A poeira aquecida por esta população pré-galáctica primitiva de estrelas teria emitido radiação infravermelha que, em virtude do desvio para o vermelho devido à expansão do Universo, apareceria hoje como um fundo de microondas.

Este é o ponto de vista pouco convencional, mas é interessante observar que, em 1979, D. P. Woody e P. L. Richards, da Universidade da Califórnia, publicaram medições que pareciam apresentar desvios na curva ideal dos corpos negros no fundo de microondas; com efeito, a curva parecia ser mais "aguda" do que deveria. Naquele mesmo ano foi assinalado por M. Rowan-Robinson, J. Negroponte e J. Silk (Queen Mary College, Londres) que Woody e Richards haviam descoberto um salto na radiação de fundo explicada pela emissão de nuvens de poeira formadas após um surto de formação estelar ao longo das linhas sugeridas por Rees. É cedo demais para dizer se esta nova idéia suportará outras investigações; entretanto, caso correta, isto implica que a grande maioria de toda a massa do Universo está contida nos remanescentes desta primitiva geração pré-galáctica de estrelas e pode hoje residir em maciços halos escuros ao redor das galáxias luminosas que vemos hoje.

O futuro do Universo

DEIXANDO DE LADO a controvertida questão da formação das galáxias, consideremos o que a teoria e observação de hoje nos têm a dizer a respeito do futuro desenvolvimento e do provável destino do Universo.

Não há dúvida de que a gravidade controlará a futura evolução dos acontecimentos. Existe matéria suficiente* no Universo para a atra-

* Estritamente falando, devemos recordar a massa-energia total do Universo, pois a energia também contribui com uma quantidade efetiva para a massa do Universo. Entretânto, os dados atuais sugerem que a matéria é de longe fator dominante na determinação da natureza aberta ou fechada do Universo.

ção gravitacional chegar a deter a dilatação e levar as galáxias a se aglomerarem novamente, de tal forma que o Universo termine em uma "Grande Compressão"? Ou, alternativamente, o Universo continuará a expandir-se sem limites? Podemos pensar na expansão do Universo nos termos do familiar conceito de velocidade de escape. De acordo com a teoria gravitacional de Newton a atração sobre uma partícula colocada dentro de um envoltório esférico oco de matéria é zero – as atrações oriundas de diferentes partes do envoltório se neutralizarão. O mesmo é válido no que se refere à teoria da Relatividade Geral. Por conseguinte, se selecionarmos para exame uma típica região esférica do Universo, o restante pode ser encarado como uma espessa concha oca fora da região selecionada – porque, de acordo com o Princípio Cosmológico, o Universo parece o mesmo em qualquer direção e a matéria deve achar-se igualmente distribuída em todas as direções. Podemos considerar uma galáxia na borda da região selecionada (Fig. 48) como influenciada somente pela matéria contida *dentro* daquela região esférica. Se a matéria está igualmente distribuída, a galáxia experimentará uma atração em direção ao centro da esfera, como se toda a massa contida na esfera estivesse concentrada ali. Em seu movimento com relação ao centro, a galáxia comportar-se-á como um projétil lançado para fora daquele ponto. Se a velocidade das galáxias for suficientemente grande, isto é, se ultrapassar a "velocidade de escape" da região esférica, continuará a afastar-se para sempre (e o Universo será aberto), mas se a galáxia não possuir suficiente velocidade esta poderá tender eventualmente para zero, momento em que ela será arrastada de volta ao centro (e o Universo será fechado).

Conhecendo a velocidade com a qual as galáxias estão se separando – esta é fornecida pela constante de Hubble – podemos deduzir que quantidade de massa teria de estar contida dentro de um determinado volume de espaço a fim de deter a expansão, isto é, podemos estabelecer a densidade média de matéria necessária para implicar um Universo fechado. Se a densidade média exceder um certo valor, conhecido como a *densidade crítica,* então o Universo por fim cessará de expandir-se e a gravidade terá ganho a batalha: o colapso final do Universo estará assegurado.

Considerando o valor de H_0 55 km/seg/Mpc, o valor da densidade crítica mostra-se cerca de 5×10^{-27} kg/m^3 ou, em média, cerca de três átomos de hidrogênio por metro cúbico – um valor muito pequeno, mas então o Universo é um lugar muito grande e sua matéria espa-

lhada de forma muito rarefeita. A determinação da densidade média é uma das tarefas cruciais da astronomia de hoje.

Outra abordagem do problema da determinação da abertura ou do fechamento do Universo é tentar medir diretamente a desaceleração da expansão, isto é, medindo aquilo que é conhecido como o *parâmetro de desaceleração* (indicado por q_0). Ao olhar para distâncias muito grandes, estamos olhando para trás, em termos de tempo, contemplando épocas nas quais – se a teoria da Grande Explosão está correta – o Universo deve ter-se expandido mais rapidamente do que está fazendo agora. Em princípio, medindo as distâncias e os desvios para o vermelho nas galáxias dentro da maior escala possível, deve ser viável encontrar um desvio da lei de Hubble para as galáxias mais remotas

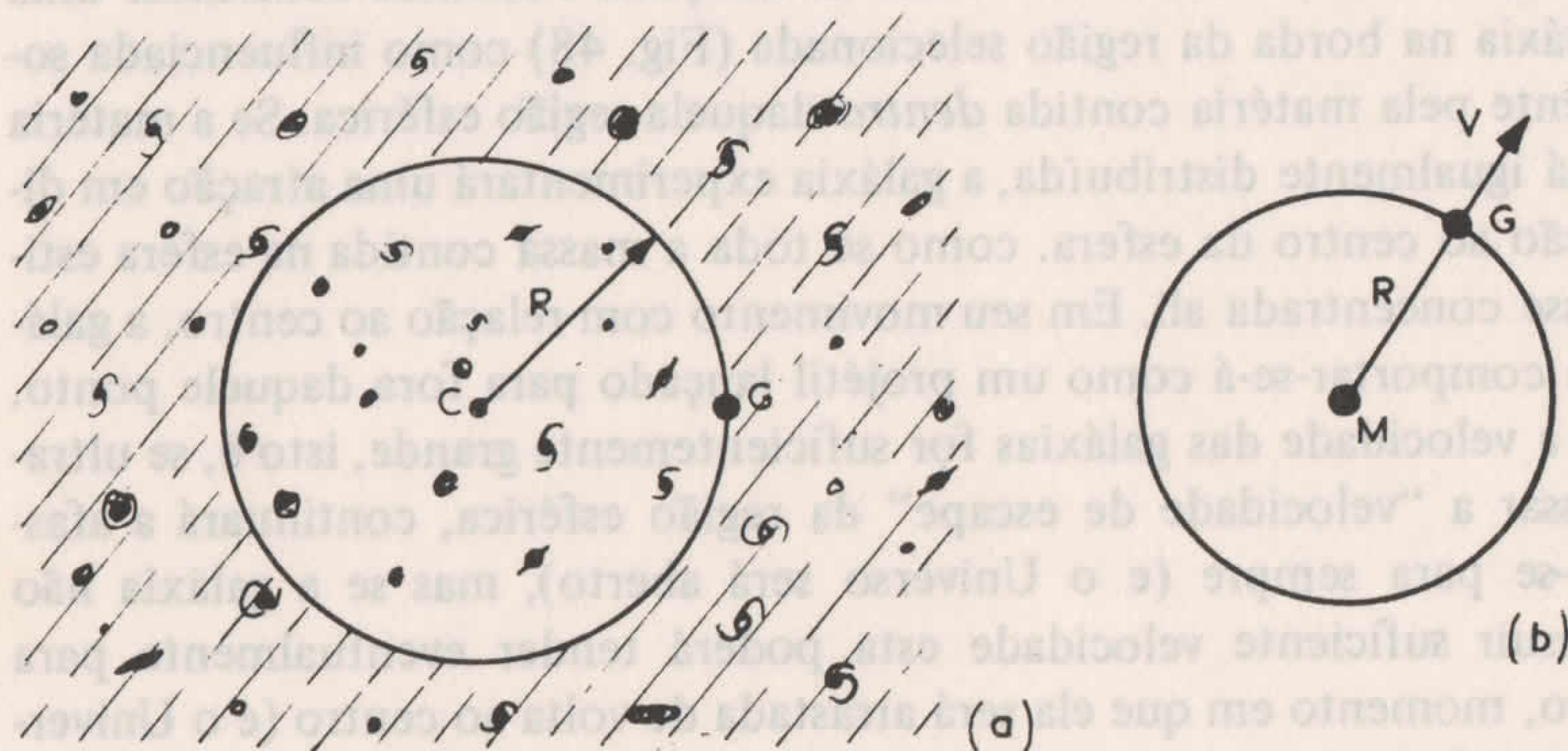



Fig. 48 Densidade média e expansão do Universo. *(*a*) Em virtude do Princípio Cosmológico, podemos escolher qualquer região esférica representativa do Universo e ignorar a atração gravitacional sobre a galáxia G de todo material que se localiza fora dessa região (veja texto). Por conseguinte (*b*), podemos considerar o movimento de G sujeito à atração da matéria dentro da esfera como se esta matéria estivesse toda concentrada em uma massa central M. Conhecendo que massa é necessária para evitar o "escapé" da galáxia G, podemos calcular que densidade média de matéria é necessária para evitar essa região e o Universo como um todo de se expandirem sem limites.*

Desvio para o vermelho (Z)

1·0	0·6
	0·5
	0·4
0·5	
0·4	0·3
0·3	
0·2	0·2
0·1	0·1
0·05	0·05
0·01	0·01

Fechado
Crítico
Aberto

$\frac{V}{C}$

10 12 14 16 18 20 22 24

Magnitude aparente

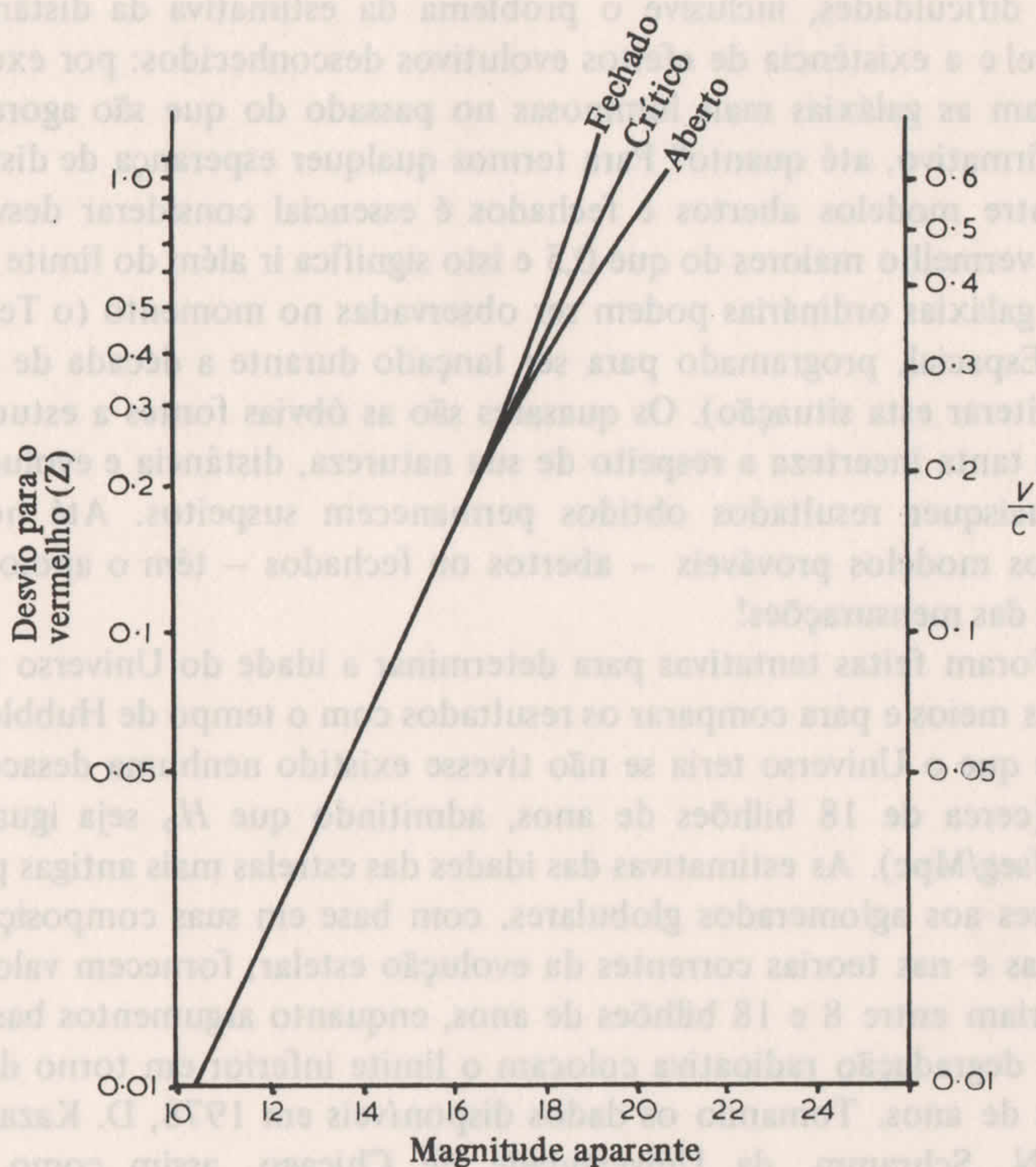



Fig. 49 Lei de Hubble para vários modelos de universos. *Os vários modelos possíveis para o Universo em expansão deram origens a diferentes leis de Hubble para grandes desvios para o vermelho. Aqui o desvio para o vermelho (e, à direita, a velocidade de recessão expressa como uma fração da velocidade da luz) estão comparadas com a magnitude aparente (uma medida da brilhância observada a qual, por sua vez, constitui uma medida de distância) no que se refere às galáxias. Se o Universo é fechado, as galáxias terão de estar se movendo mais depressa do que no passado do que fariam se o Universo fosse aberto. Entretanto, é somente ao nível de grandes desvios para o vermelho que essas diferenças começam a tornar-se aparentes e os resultados até agora são bastante bons apenas para excluir um Universo em desaceleração* muito *rápida – o qual seria, obviamente, fechado.*

(Fig. 49). Na prática mostrou-se impossível, pelo menos até agora, obter resultados confiáveis e coerentes a partir desta abordagem. Existem muitas dificuldades, inclusive o problema da estimativa da distância confiável e a existência de efeitos evolutivos desconhecidos: por exemplo, eram as galáxias mais luminosas no passado do que são agora e, caso afirmativo, até quanto? Para termos qualquer esperança de distinguir entre modelos abertos e fechados é essencial considerar desvios para o vermelho maiores do que 0,5 e isto significa ir além do limite em que as galáxias ordinárias podem ser observadas no momento (o Telescópio Espacial, programado para ser lançado durante a década de 80, pode alterar esta situação). Os quasares são as óbvias fontes a estudar, mas há tanta incerteza a respeito de sua natureza, distância e evolução que quaisquer resultados obtidos permanecem suspeitos. Até hoje, todos os modelos prováveis – abertos ou fechados – têm o apoio de *alguma* das mensurações!

Foram feitas tentativas para determinar a idade do Universo por diversos meios e para comparar os resultados com o tempo de Hubble – a idade que o Universo teria se não tivesse existido nenhuma desaceleração (cerca de 18 bilhões de anos, admitindo que H_0 seja igual a 55 km/seg/Mpc). As estimativas das idades das estrelas mais antigas pertencentes aos aglomerados globulares, com base em suas composições químicas e nas teorias correntes da evolução estelar, fornecem valores que variam entre 8 e 18 bilhões de anos, enquanto argumentos baseados na degradação radioativa colocam o limite inferior em torno de 6 bilhões de anos. Tomando os dados disponíveis em 1978, D. Kazanas e D. N. Schramm, da Universidade de Chicago, assim como K. Hainebach da Universidade da Califórnia, concluíram que a idade mais coerente com os dados disponíveis situa-se entre 13,5 e 15,5 bilhões de anos, um valor coerente com o Universo aberto e em contínua expansão.

Por outro lado, em 1977, D. Lynden-Bell, de Cambridge, obteve um valor para H_0 em torno de 110 km/seg/Mpc, conseqüência de sua análise de um modelo que ele desenvolveu para explicar as aparentes velocidades de separação superluminal dos radiocomponentes em certos quasares. Tal valor, caso correto, implicaria que a idade atribuída por Hubble ao Universo é de apenas 9 bilhões de anos, um valor incoerente com as idades das estrelas mais antigas que conhecemos.

De fato, se levarmos em conta a desaceleração, surgem problemas muito reais ao tentar encaixar as idades calculadas das estrelas em um

modelo simples de Grande Explosão. Os resultados publicados em 1979 por D. Hanes, de Cambridge, indicam uma idade de Hubble em torno de 13 bilhões de anos, enquanto no mesmo ano M. Aaronson, do Observatório Steward, J. Huchra, de Harvard e J. Mould, do Observatório Nacional de Kitt Peak publicaram resultados baseados em mensurações infravermelhas e as luminosidades das galáxias que indicam uma idade em torno de 10 bilhões de anos (H_0 = 100 km/seg/Mpc).

Mais recentemente, em 1980, os resultados de uma análise do elemento radioativo rênio em amostras de meteoritos foram publicados por J. M. Luck, J. L. Birk e por C. J. Allende, da Universidade de Paris. O rênio tem uma meia-vida muito longa (a metade de qualquer amostra se degradará para formar ósmio em um período de 60 bilhões de anos) e comparando as quantidades de rênio e ósmio em meteoritos – admitindo que o rênio tenha se formado em supernovas em uma época muito remota – os autores concluíram que a idade do Universo acha-se entre 13 e 22 bilhões de anos.

No momento, embora seja provavelmente verdadeiro dizer que a maior parte dos astrônomos favorece valores de H_0 que fornece uma idade de Hubble em torno de 18 bilhões de anos, existe muito desacordo e por isso não é possível comparar a idade de Hubble com as idades das partes componentes do Universo a fim de avaliar o índice de desaceleração.

A densidade média do Universo

NO MOMENTO, a mais esperançosa abordagem para lidar com o problema da futura evolução do Universo parece residir na avaliação da densidade média da matéria. Como isto pode ser feito?

A abordagem óbvia consiste em medir as massas de todas as galáxias dentro de um determinado volume do espaço; dividindo isto pelo volume obteríamos o valor da densidade média.

O movimento rotatório das estrelas e do gás em uma galáxia depende das forças gravitacionais às quais eles estão sujeitos de forma que – num ponto de vista bastante simples – as velocidades com que as estrelas nas regiões exteriores de uma galáxia viajam dependem da massa dessa galáxia. Analisando esses movimentos podemos obter uma estimativa da massa. A luminosidade total e as características espectrais de uma galáxia também podem ser utilizadas para avaliar a massa, uma

vez que podemos calcular o número de estrelas necessárias para produzir essa luminosidade; regras gerais relacionando a massa com a luminosidade (proporção M/L) podem ser estabelecidas para diferentes tipos de galáxias. Armados com esta informação, é possível contar o número de galáxias existentes em um determinado volume do espaço e avaliar suas massas, assim levando ao valor da densidade média.

Tal como com a maior parte das pesquisas cosmológicas, é difícil aplicar estas idéias na prática. Incertezas quanto às massas individuais das estrelas e quanto à distribuição das galáxias devido ao aglomeramento e superaglomeramento, os problemas da medida das distâncias e a possibilidade de nossa incapacidade de visualizar grande número de galáxias pouco luminosas – tudo isto conspira para adicionar uma considerável dose de incerteza aos nossos cálculos. Não obstante, sem exceção, todas as estimativas disponíveis indicam que não existe matéria suficiente nas galáxias visíveis para deter a expansão do Universo. Os valores atuais sugerem que as galáxias visíveis contêm de 1 a 4 por cento (embora as incertezas possam empurrar este valor a um máximo de 10 por cento) da matéria necessária para fechar o Universo.

Se toda a matéria estivesse contida apenas nas galáxias visíveis, então o Universo estaria destinado a expandir-se para sempre. Uma pergunta óbvia a ser feita é: "*Está* toda a matéria do Universo contida sob a forma de galáxias luminosas?" Existem indícios importantes que nos permitem dizer um inequívoco "não" em resposta a essa pergunta: os indícios que estão sendo reunidos quase diariamente apontam para o fato de que o material visível observado nas galáxias constitui meramente uma fração da massa total do Universo.

Uma das primeiras pistas sobre a existência de uma grande proporção de matéria invisível provém da análise das aglomerações de galáxias. Uma forma de medir a massa de uma aglomeração dessas consiste em somar as massas das galáxias visíveis; no que se refere à aglomeração Coma, por exemplo, a massa vem a ser cerca de 30.000 bilhões de massas solares. Outra abordagem depende da mensuração do movimento das galáxias componentes da aglomeração e leva ao que é conhecido como a *massa virial** da aglomeração. No caso da aglomeração cha-

* O *teorema virial* relaciona as energias cinéticas dos membros da numeração com a energia gravitacional total desta. Se as velocidades das galáxias forem bastante elevadas elas escaparão e a aglomeração se dispersará. Medindo essas velocidades podemos determinar a massa total necessária para manter a aglomeração estável.

mada Coma, a massa virial vem a ser cerca de 100 vezes maior do que a obtida pela contagem das massas das galáxias visíveis!

Embora este seja um exemplo extremo, permanece o fato de que, quando aglomerações e grupos de galáxias são investigados desta maneira, invariavelmente verifica-se que é necessário mais massa para mantê-las juntas do que é revelado pelas estimativas da massa das galáxias visíveis.

Que formas pode tomar esta massa que falta? Uma possibilidade é a existência de nuvens de gás no espaço entre as galáxias. Indícios da existência de gás intergalático surgem sob várias formas. Existem algumas radiogaláxias, tais como a NGC 1265, na aglomeração Perseus, cuja forma, observada em mapas obtidos através do rádio, mostram uma estrutura distintamente constituída de cabeça e cauda, como se suas nuvens radioemissoras estivessem sendo arrastadas pela massa principal da galáxia "por um vento" criado pelo movimento da galáxia através de um tênue meio de gás intergalático. Se esse gás fosse muito quente e ionizado (constituído de partículas carregadas) ele não emitiria a característica radiação de 21 cm que revela a presença de nuvens de hidrogênio em nossa própria galáxia e assim não seríamos capazes de detectá-las diretamente.

O indício mais convincente da presença de gás intergalático nas aglomerações de galáxias provém das observações da emissão de raios X oriundas dessas aglomerações, uma vez que essa emissão provém de regiões indeterminadas das aglomerações ao invés das galáxias componentes. Gás a temperaturas em torno de 10 a 20 milhões de graus Kelvin emitiria raios X do tipo apropriado. Não menos do que 20 das fontes originais obtidas pelo levantamento pelos raios X feitos pelo satélite Uhuru mostraram-se aglomerações de galáxias, e posteriores gerações de satélites ampliaram e melhoraram nosso conhecimento das fontes deste tipo. A fonte da aglomeração Coma, por exemplo, pode ser explicada por uma nuvem de gás com uma massa em torno de 5×10^{14} massas solares. Entretanto, mesmo isto constitui apenas cerca de um décimo da massa total exigida para manter a aglomeração estável.

A massa intergalática contida nessas aglomerações até agora detectadas pelos raios X não parece proporcionar massas suficientes para manter as aglomerações galáticas estáveis e certamente não indica a presença de massa suficiente para fechar o Universo. Observações recentes de galáxias levantaram a possibilidade de que as galáxias possuam maciços halos de um material, possivelmente sob a forma de estrelas "mor-

tas", que podem ter se formado muito cedo na história do Universo. Foi proposto que, se, como Rees e outros sugeriam, uma grande proporção da matéria contida no Universo esteja envolvida em um surto de formação de estrelas quando o Universo era muito jovem, a reunião dessas primeiras estrelas em estruturas hierárquicas pode ter levado à formação de galáxias, sendo as galáxias que vemos hoje apenas os remanescentes luminosos formados do gás que se acumulou no centro de sistemas maciços de estrelas mortas ou agonizantes. Se nada menos que 90 por cento da massa de uma galáxia típica estão contidos em seu halo invisível, então verificamos que a massa exigida para manter as aglomerações de galáxias estáveis encontra-se aí. Entretanto, mesmo isto se mostrando verdadeiro, os halos provavelmente não contêm massa suficiente para fechar o Universo inteiro.

Foi levantada a hipótese de que possa existir uma tênue distribuição em alta escala de matéria através do Universo, mesmo entre as aglomerações. As opiniões a este respeito têm variado na medida das observações e das teorias. As medidas feitas em 1978 pelo satélite HEAO-1, através dos raios X, indicam um fundo universal difuso de raios X que poderia ser explicado pela presença de um plasma quente e que invadiria tudo (gás ionizado), possivelmente contendo material suficiente para fechar o Universo. Logo no início do ano seguinte, o Observatório Einstein (HEAO-2) mostrou que uma substancial fração do fundo de raios X poderia dever-se a fontes isoladas, tais como os quasares – mais de 100 dos quais são emissores de raios X. À luz destas evidências, parece *muito improvável* que exista gás quente suficiente para deter a expansão do Universo.

Existem outras possibilidades dignas de consideração? Grande número de neutrinos ou de ondas gravitacionais produzidas na Grande Explosão poderiam transportar substanciais quantidades de energia que contribuiriam para a curvatura do Universo. A detecção destes fatores acha-se além das nossas possibilidades atuais – é bastante difícil colher neutrinos oriundos do Sol! – mas a opinião geral é que esses fatores não exerçam provavelmente um efeito significativo, embora recentes sugestões de que os neutrinos possam possuir massas finitas em repouso possam alterar sensivelmente a situação.

Os buracos negros parecem ser os repositórios ideais de quase ilimitadas quantidades de matéria oculta, mas são tão difíceis de detectar que se torna difícil estabelecer limites a respeito de sua possível quantidade. Não obstante, certos limites superiores *podem* ser deduzidos. Por

exemplo, a quantidade de radiação gama de fundo, como já vimos, estabelece limites quanto ao possível número de buracos negros primordiais: a menos que miniburacos negros menores do que a massa de Hawking (a massa dos buracos que presentemente explodem) por alguma razão fossem impedidos de se formar, o limite dos buracos negros primordiais chegaria apenas a 1 centésimo milionésimo da massa crítica. Na outra extremidade da escala, números significativos de buracos negros de grande massa teriam de ser excluídos, uma vez que qualquer buraco de massa maior do que cerca de 10^{15} massas solares produziria gigantescas distorções gravitacionais nas galáxias e nos aglomerados, assim como apreciáveis efeitos de lente gravitacional. Até agora, embora cerca de 1.000 quasares sejam conhecidos, só existe um caso plausível de imagem dupla devido ao efeito da lente gravitacional, e a lente nesse caso parece ser uma galáxia de grande massa ao invés de um buraco negro.

De acordo com B. Carr, de Cambridge, que em 1978 avaliou os diversos limites que poderiam ser colocados aos buracos negros naquela época, a ausência dos efeitos de dupla imagem colocou um limite quanto ao número de buracos negros com massas acima de 10^{12} massas solares; este limite lhes permitiu contribuir com menos de 2 por cento da densidade crítica. A contribuição dada à massa total pelos buracos negros ou por outros corpos de grande massa depende do fato deles estarem aglomerados em galáxias ou dispersos através do espaço. Na opinião de Carr, os buracos negros poderiam proporcionar bastante massa para fechar o Universo somente se *não estivessem aglomerados*, o que implica que eles se formaram antes das galáxias e não dentro delas.

Como vimos, pode ter havido um rápido surto de formação de estrelas pouco depois do Universo tornar-se transparente, cerca de 700.000 anos após a Grande Explosão. Nesta fase é possível que massas em torno de 1 milhão de massas solares possam ter entrado em colapso para formar diretamente buracos negros ou poderiam ter-se fragmentado em numerosas estrelas de grande massa que em seguida evoluíram rapidamente para tornar-se buracos negros. Tais buracos provavelmente estariam na faixa de massa entre uma centena até 1 milhão de massas solares e poderiam compreender uma substancial fração dos halos galácticos. Neste contexto, é interessante notar que o trabalho de Rowan-Robinson e seus colegas, ao qual nos referimos mais acima, sugere que,

se a poeira destas primeiras gerações de estrelas é responsável pela "corcova" no fundo de microondas, a massa das estrelas agora mortas envolvidas teria de ter sido comparável com a densidade crítica.

Outra observação fascinante indicativa da presença da massa oculta em nossa vizinhança resultou de algumas medidas realizadas no final dos anos 70 graças a utilização de um avião U-2, que voa a grandes altitudes, por G. F. Smoot, M. V. Gorenstein e R. A. Muller, da Universidade da Califórnia. Os resultados mostraram que nossa galáxia, juntamente com o restante do Grupo Local, está se movendo em relação ao fundo de radiação de microondas; o movimento é revelado por um ligeiro desvio para o azul no fundo em direção para o qual estamos nos encaminhando, e um ligeiro desvio para o vermelho no fundo reção a um ponto próximo ao aglomerado de galáxias Virgo, a uma vereção a um ponto máximo ao aglomerado de galáxias Virgo, a uma velocidade em torno de 600 km/seg. Uma interpretação deste fato é que o superaglomerado de Virgo contém muito mais matéria do que previamente supúnhamos, embora uma alternativa seja de que a massa de atração seja muito maior e se localize além do superaglomerado Virgo. Qualquer que seja a verdade, estas observações parecem demonstrar a existência de uma ausência de homogeneidade em grande escala na estrutura do Universo, a despeito de sua aparência geral de uniformidade e isotropia. Resta verificar se o modelo padronizado da Grande Explosão pode acomodar irregularidades desta espécie.

Existem, portanto, indícios claros da existência de uma muito maior quantidade de matéria do que podemos ver, mas precisamente quanta constitui um tema de grande debate. Se todas as técnicas precedentes que tentam medir a densidade da matéria atual são limitadas por erros de observação e interpretação, existe algum outro meio de lidar com o problema da densidade média?

Pode ser que a atual abundância de deutério (hidrogênio "pesado", contendo não apenas um próton mas também um nêutron em seu núcleo) proporcione uma pista vital. De acordo com o modelo padronizado, o deutério teria se formado quando o Universo tinha cerca de 3 minutos de idade, tendo sido a sua formação um pré-requisito essencial para a formação de grandes quantidades de hélio. A quantidade de deutério que sobreviveu à Grande Explosão depende em grande parte da temperatura e da densidade predominantes ao tempo da formação do hélio e isto, por sua vez, relaciona-se diretamente com a *presente* densidade da matéria contida no Universo.

Constitui uma tarefa difícil obter valores confiáveis para a abundância universal de deutério, mas as estimativas atuais indicam que cerca de 20 partes por milhão do meio interestelar são compostas de deutério, e isto se mostra coerente com a densidade média presente em torno de 4×10^{-28} kg por metro cúbico – menos de 1 décimo da densidade crítica. Se a presente densidade fosse 10 vezes maior, menos de 1 milésimo da quantidade observada de deutério teria sobrevivido. A abundância de "hélio livre" (^{3}He) e lítio também é bastante coerente com as condições iniciais, e as quantidades medidas desses elementos coincidem com a insuficiência de sua massa para fechar o Universo. Estes resultados, embora altamente sugestivos, dependem da suposição de que as quantidades existentes de deutério, ^{3}He e lítio foram produzidas na Grande Explosão e ainda existe uma grande margem de incerteza a respeito.

Em resumo, então, podemos dizer que a porcentagem conhecida dos elementos mais leves, as massas conhecidas dos aglomerados de galáxias, os limites superiores impostos à maior parte dos tipos de buracos negros e a ausência de claros indícios relativos à existência de grande quantidade de matéria entre as aglomerações tendem a favorecer o ponto de vista de que vivemos em um Universo aberto e em contínua expansão. O parâmetro da desaceleração não pode ser considerado fidedigno para nos fornecer uma clara indicação a respeito e as possibilidades de um Universo fechado se baseiam em incertezas nos dados existentes e na existência de matéria oculta e ainda não detectada, assim como de partículas ou de radiação na mesma situação.

O que se conclui dos indícios disponíveis favorece desconfortavelmente o modelo da expansão contínua, mas devemos assinalar que a tendência das descobertas realizadas nos últimos anos é de aumentar, geralmente, a densidade média observada. Alguns anos atrás, os dados favoreciam claramente um Universo aberto; hoje estamos menos confiantes e tudo que podemos afirmar é que, se o Universo é realmente fechado, então a densidade média não excede a densidade crítica de muito. Entretanto, como o valor da densidade crítica depende do quadrado da constante de Hubble, uma constante cujo valor não é conhecido com certeza, devemos ter cuidado para não ser dogmáticos.

Um Universo oscilante?

SE OLHARMOS para um gráfico do "raio" do Universo comparando-o com o tempo em um Universo fechado (Fig. 46), veremos que ele é simétrico: o Universo se expande rapidamente a princípio, faz uma parada e então se comprime outra vez, sofrendo uma aceleração global até que toda a matéria e toda a energia sejam comprimidas em uma bola de fogo e em uma singularidade final – a Grande Compressão. Se nosso Universo se mostrar, afinal de contas, um sistema fechado, a Grande Compressão marcará o fim do espaço e do tempo?

Já se argumentou que o colapso levaria a um tipo de "rebote", resultando em uma nova revolução que produziria uma nova Grande Explosão, dando início a um novo ciclo do Universo. Esta atraente idéia é a base da teoria do *Universo oscilante* (Fig. 50), um Universo que se expande e se contrai de maneira cíclica, sendo a matéria e a energia reprocessadas no final de cada ciclo. Esta idéia "ecologicamente aceitável" desperta grande atração filosófica, combinando as virtudes de um Universo finito, porém ilimitado com o caráter intemporal da antiga

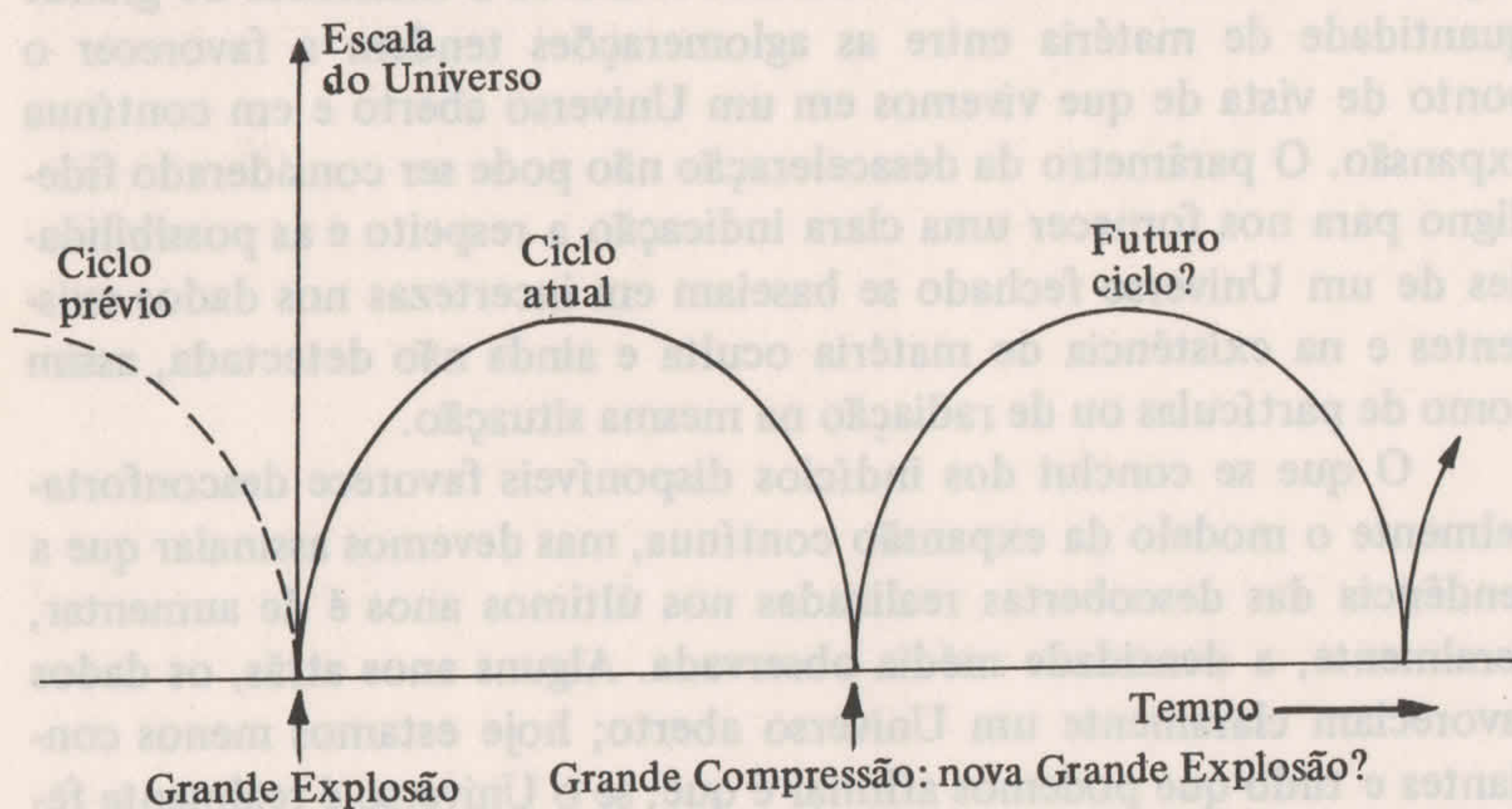



Fig. 50 O Universo oscilante. *Se vivemos em um Universo oscilante a escala, ou "raio" do Universo iria expandir-se e contrair-se de uma forma regular e periódica. O colapso no final de um ciclo (a Grande Compressão) deveria anunciar uma nova Grande Explosão e o começo de um novo ciclo. Se esta teoria for correta, a expansão e a contração podem continuar indefinidamente no "futuro" e pode ter havido um número infinito de ciclos primitivos antes do nosso.*

hipótese da estabilidade. Tal Universo não teria um único começo ou fim, mas apenas uma série infindável de ciclos.

Entretanto, não se trata mais do que um ato de fé supor que uma reexpansão ocorreria, porque não existe nenhuma lei física conhecida que permitisse isto acontecer. A física moderna sugere que o Universo entraria em colapso sem limite em uma singularidade tal como a que se supõe existir dentro do buraco negro. Tornar-se-ia o Universo um buraco negro ou é, talvez, agora mesmo, um buraco negro?

Se o Universo é fechado então trata-se, em certo sentido, de "uma região do espaço da qual nada pode escapar". Entretanto, traz alguma confusão tentar aplicar o simples conceito de buraco negro ao Universo como um todo. Um buraco negro é uma região fechada do espaço dentro de um espaço-tempo externo; ou seja, os buracos negros se formam *dentro* do nosso Universo. Tratar o Universo como um buraco negro levaria a pressupor a existência de um espaço-tempo *externo* dentro do qual o Universo existe. Este pode ser o caso – talvez exista uma ilimitável multidão de "Universos", existindo como bolhas em um espaço-tempo maior – mas não possuímos absolutamente qualquer prova para apoiar isto. No momento devemos restringir nossa aplicação do termo "buraco negro" a entidades interiores ao nosso Universo.

Ainda nos defrontamos com o problema da singularidade inicial e é natural – muito embora não seja estritamente lógico – indagar "donde" a singularidade provém ou donde a matéria e a energia provêm. Se o espaço e o tempo começaram com a Grande Explosão, não há sentido em perguntar o que aconteceu "antes", uma vez que o tempo não existia antes desses instantes. Por outro lado, a singularidade da Grande Explosão relembra o conceito de buraco branco: será que a nossa Grande Explosão proveio de uma Grande Compressão anterior? Estas áreas de raciocínio estão sendo intensamente especuladas, mas podemos confiar que a contínua investigação das propriedades dos buracos negros e de suas singularidades nos ajudará a compreender um pouco o que ocorreu nessa grande singularidade do nosso passado.

O destino final de um Universo em contínua expansão

SE, COMO a soma dos indícios sugere, o Universo está destinado a expandir-se sem limites, o que nos trará o futuro? À medida que a expansão continua, a matéria se tornará mais e mais amplamente dispersa e a

radiação de fundo esfriará até o zero absoluto. Com o tempo, todas as estrelas terão passado através de seus ciclos vitais, terminando como anãs brancas – as quais eventualmente esfriarão até se tornarem anãs negras geladas –, estrelas nêutrons ou buracos negros. A era da matéria luminosa chegará ao fim e massas negras, juntamente com partículas elementares de radiação, mergulharão obscuramente em um vazio cada vez maior.

Os buracos negros ainda terão um papel a desempenhar. Dado tempo suficiente, a maior parte da matéria contida no Universo será engolida pelos buracos. Se as teorias de Hawking estão corretas, eles emitirão radiação, mas no que se refere aos buracos de massa estelar leva muito tempo antes que isto atinja qualquer efeito significativo. A temperatura de fundo terá de baixar muito antes que tais buracos negros comecem a irradiar mais do que estão absorvendo do substrato cósmico: este estado de coisas não ocorrerá até o Universo ter cerca de 10 milhões de vezes mais idade do que se considera que tenha hoje. Cerca de 10^{66} anos decorrerão antes que os buracos de massa estelar explodam em chuveiros de partículas e radiação.

J. D. Barrow, da Universidade de Oxford, e F. Tipler, da Universidade da Califórnia, pintaram a seguinte imagem gráfica do futuro a longo prazo de um Universo em contínua expansão. Mesmo dentro de uma velha estrela nêutron haveria suficiente energia residual para imprimir de tempos em tempos velocidades acima da velocidade de escape a partículas em sua superfície; desta forma, durante um período de tempo suficientemente longo, as estrelas nêutrons acabariam por se evaporar. Os buracos negros igualmente decairiam através da liberação de quantidades iguais de partículas e antipartículas. Barrow e Tipler argumentam que, se o Universo possui energia bastante para expandir-se continuamente, a tração elétrica entre os pares de elétrons e pósitrons sobrecarregará tanto a tração gravitacional quanto o efeito da expansão geral do Universo, de tal forma que dentro de um tempo finito todo o elétron encontrará o seu pósitron, produzindo-se a aniquilação mútua. Assim sendo, o estado final não será uma coleção de corpos escuros ou buracos negros afastando-se entre si mas um tênue mar de radiação, esfriando até uma temperatura uniforme final.

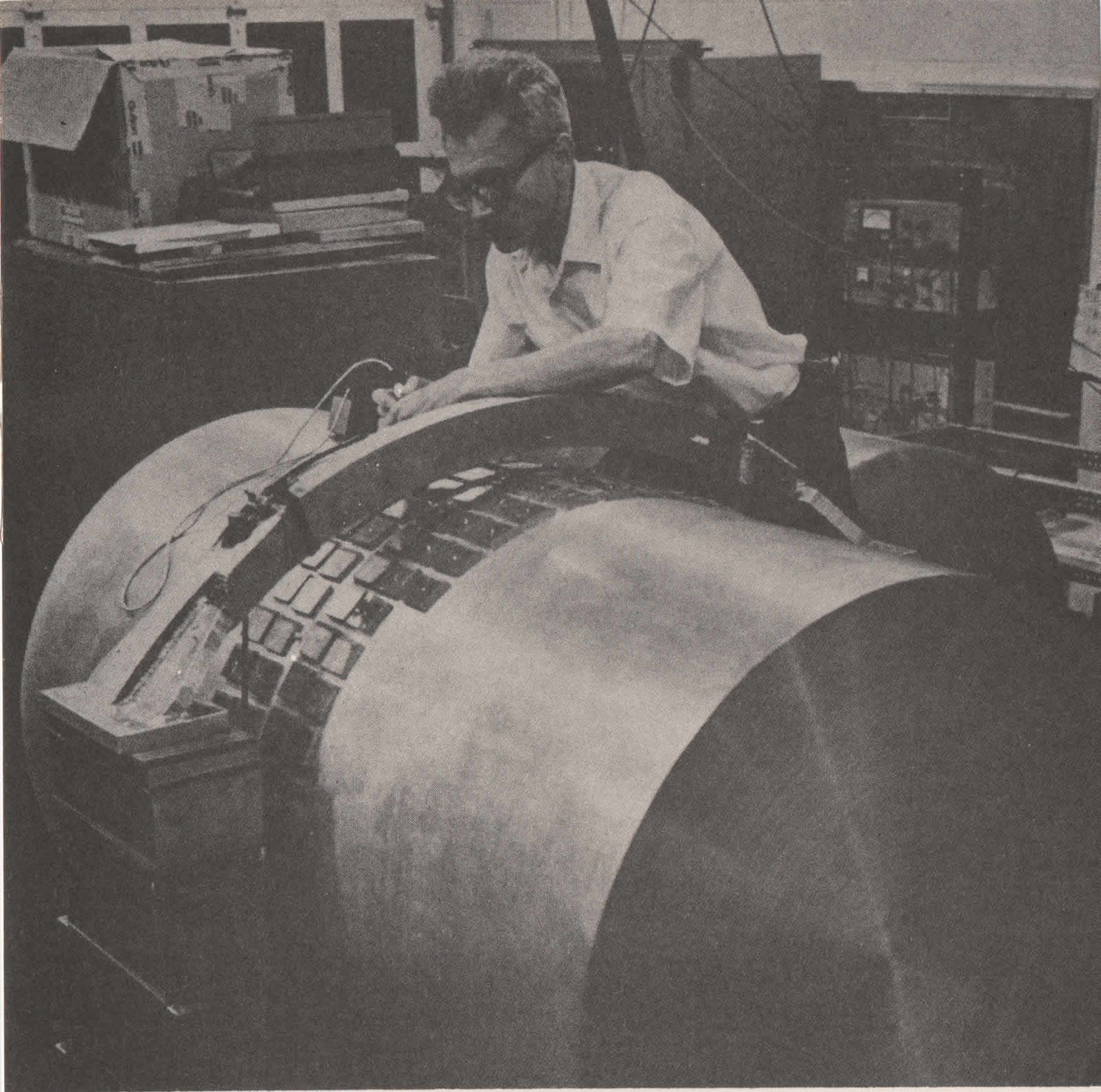
A segunda lei da termodinâmica prevê que o estado final do Universo consiste em atingir lentamente uma temperatura uniforme – à medida que o calor passa dos corpos quentes a outros mais frios, todas as diferenças desaparecem e nenhum trabalho é possível depois. Este

conceito da "morte térmica" do Universo foi estabelecido pela primeira vez por H. L. F. von Helmholtz (1821-1894) já em 1854. É intrigante e adequado verificar que nossa moderna visão de um Universo em contínua expansão, acoplada com o conceito da emissão de quanta dos buracos negros – uma idéia que surgiu a partir de analogias entre a física gravitacional e a termodinâmica – levaria, por um caminho mais tortuoso, à mesma conclusão essencial.

Não sabemos certamente qual será o resultado da batalha entre a expansão e a gravitação. Se a gravidade ganhar, o Universo eventualmente entrará em colapso em uma Grande Compressão, possivelmente um evento final ou talvez o prelúdio de um novo ciclo de expansão. Se a gravidade perder a batalha, a expansão prosseguirá para sempre, mas a gravidade terá desempenhado um papel vital na determinação do estado final do Universo, seja ele um mar uniforme de radiação ou uma coleção de massas escuras em expansão. No distante futuro a época da atividade estelar pode parecer um instante inconcebivelmente curto: um mero pestanejar do olho cósmico.

Será este o destino do Universo? Talvez, mas parece bastante triste e sem sentido que o Universo tão maravilhoso e complexo se transforme em um vazio amorfo e escuro. Para muitos, tenho certeza, o Universo oscilante tem muito a prometer, oferecendo novas esperanças, se não a seres vivos, pelo menos a coisas familiares como matéria e energia. Entretanto, nada que façamos irá alterar a densidade ou destino do cosmos; temos de aceitá-lo como ele é. Não podemos escolher nosso Universo.

As Antenas – o par de galáxias NGC 4038 e 4039. Localizadas a uma distância em torno de 100 milhões de anos-luz, essas galáxias estão tão próximas no espaço que sua mútua atração gravitacional distorceu grndemente sua estruturas, dando origem às alongadas "antenas", medindo meio milhão de anos-luz de ponta a ponta. (Fotografia da Unidade Telescópica Schmidt, da Inglaterra, cortesia Photolabs, Observatório Real, Edimburgo.)

O aglomerado Virgo de galáxias. A fotografia mostra a região central deste aglomerado o qual, a uma distância em torno de 50 milhões de anos-luz, é o mais próximo aglomerado gigante que conhecemos. A galáxia espiral NGC 4438 foi grandemente distorcida em conseqüência de sua colisão com sua companheira NGC 4435. No canto inferior esquerdo está a gigantesca galáxia elíptica M87, cujo jato nuclear não aparece nesta fotografia. (Fotografia da Unidade Telescópia Schmidt, Inglaterra, cortesia Photolabs, Observatório Real, Edimburgo.)

Detector de ondas gravitacionais construído pelo Professor J. Weber (visto aqui), da Universidade de Maryland, EUA. O detector consiste de um ciclindro de alumínio, pesando cerca de 4 toneladas, que deveria vibrar com uma diminuta amplitude ao ser atingido por uma onda gravitacional. Embora os resultados iniciais de Weber pareçam indicar a detecção de ondas gravitacionais, procura-se especular hoje se os efeitos que têm medido não se deveram a outras causas. Embora as ondas gravitacionais ainda precisem ser positivamente detectadas, o trabalho pioneiro de Weber coloca os alicerces para um novo potencialmente excitante ramo da astronomia. (Cortesia do Professor J. Weber, Universidade de Maryland.)

PARTE TRÊS
Epílogo

12
A Natureza da Gravidade

NOSSA DISCUSSÃO sobre buracos negros e a respeito da estrutura, da origem e da evolução do Universo fundamentou-se na melhor teoria disponível da gravitação, a Relatividade Geral. Mas será mesmo a "melhor teoria", ou existirão teorias diferentes e melhores, prontas para surgir à luz dos novos experimentos?

Uma nova teoria sobre a gravitação teria profundas implicações sobre nossa concepção do Universo como um todo. A Relatividade Geral passou em todos os exames a que foi submetida nas últimas seis décadas, porém, em geral, as provas descritas no Capítulo 5 confirmaram as previsões da teoria em nível comparativamente modesto de precisão. Isto não é nada surpreendente se atentarmos para a fraqueza da gravitação diante das outras forças da natureza; as diferenças entre a teoria newtoniana e a Relatividade Geral são muito pequenas a menos que se esteja examinando uma situação envolvendo extremos de gravidade – como é o caso quando se trata de um buraco negro.

Existem teorias alternativas. Na verdade, existem várias famílias de teorias dos mais diversos graus de complexidade, porém a maior parte delas faz previsões que divergem apenas em graus marginais das feitas pela Relatividade Geral, pelo menos dentro das circunstâncias em que tem sido possível realizar as provas até o momento. Estas teorias, em sua maior parte, são mais complicadas do que a da Relatividade Geral e algumas delas pressupõem que certas constantes da natureza –

em geral a constante gravitacional G – mudem com o tempo; na ausência de provas cabais a seu favor, não há motivo para se adotar qualquer uma delas no lugar de uma teoria estabelecida mais simples e mais conhecida que parece funcionar tão bem. Contudo devemos estar atentos à possibilidade de que uma discrepância pequena e aparentemente inócua entre a observação e as previsões teóricas venha substituir a Relatividade Geral por uma teoria mais complexa, tal como a explicação do movimento orbitário de Mercúrio exigiu o abandono da mecânica newtoniana e da gravitação.

Teorias em que G é variável

UM ASPECTO central tanto da teoria newtoniana quanto da Relatividade Geral é que a constante gravitacional é verdadeiramente constante em todos os tempos. Isto quer dizer que a interação gravitacional entre dois corpos de determinadas massas hoje é a mesma que no começo do Universo.

Isto é necessariamente assim? O primeiro físico a questionar seriamente a constância de G foi P. A. M. Dirac, da Universidade de Cambridge; em 1937 ele vislumbrou o que se conhece como "hipótese dos grandes números", fundamentada sobre diversas coincidências notáveis nas relações entre quantidades físicas básicas.

Exemplificando, a relação da força eletrostática de repulsão entre dois elétrons comparada à atração gravitacional entre eles gira em torno de 10^{40}:1, número este extremamente grande. Se compararmos aquilo que pode ser chamado de "raio" do Universo com o raio de um elétron (novamente, como um elétron não é *realmente* uma pequena bola de bilhar, o termo "raio" deve ser usado com certo cuidado) chegamos mais uma vez à relação em torno de 10^{40}:1. (Observando esta última comparação de outra forma, podemos comparar a idade do Universo, que se situa entre 10^{17} e 10^{18} segundos, com o tempo que a luz leva para atravessar um elétron, cerca de 10^{-23} segundos, e vemos novamente que a relação é de 10^{40}:1.) A primeira relação diz respeito a certas constantes atômicas fundamentais, enquanto a segunda abrange estas mesmas constantes fundamentais e a constante de Hubble, que determina a dimensão e a idade do Universo.

Dirac percebeu que isto não era uma coincidência e que estas relações mostravam uma ligação entre os valores de constantes fundamentais e a idade do Universo. A comparação das quantidades envolvidas nas duas relações indicava que o valor de G deveria ser inversamente proporcional à idade do Universo, e que à medida que o tempo passasse, a gravidade diminuiria; em outras palavras, à medida que o raio do Universo aumenta, a segunda relação torna-se maior que $10^{40}:1$, de forma que se as duas relações estão genuinamente ligadas, então a primeira relação deve também aumentar com o tempo, resultando daí que a força gravitacional deve diminuir em relação à força eletrostática.

Este foi um argumento puramente filosófico baseado em coincidências numéricas do tipo que Pitágoras e Kepler certamente dariam aprovação.

Um outro conceito filosófico que pode ser interpretado como indicativo de que as forças gravitacionais devem diminuir com o tempo é o Princípio de Mach (ver Capítulo 4), que afirma que a inércia de um corpo deve-se à influência de massas distantes em partes remotas do Universo. Se, como D. Sciama (então em Cambridge) questionou na década de 50, esta interação fosse de natureza gravitacional, seria então razoável esperar que a interação diminuiria com o aumento de tamanho do Universo. Se a inércia diminuísse, G também deveria fazê-lo pois o princípio da equivalência exige que as massas gravitacionais e inerciais estejam em proporção exata.

Das diversas teorias criadas utilizando o conceito de G variável, uma que suscitou considerável interesse foi a teoria escalar-tensorial de Brans-Dicke, anunciada em 1961 por C. Brans e R. Dicke, da Universidade de Princeton. Adotando o ponto de vista do Princípio de Mach, a teoria sugeria que o valor local de G é determinado pela estrutura do Universo, e permitia a possibilidade de que o valor de G variasse de lugar para lugar e de tempo para tempo. As equações da teoria de Brans-Dicke eram semelhantes às da Relatividade Geral mas, para acomodar o Princípio de Mach, incluía uma quantidade variável extra, o "campo escalar", permitindo G variar.

Como vimos no Capítulo 5, uma das provas clássicas da Relatividade Geral é o avanço do periélio de Mercúrio. A teoria de Einstein justifica de modo satisfatório a discrepância de 43 segundos de arco por século entre as previsões da teoria newtoniana e a alteração observada de órbita. Nos cálculos, o Sol foi considerado como uma esfera perfeita; mas qualquer achatamento dos pólos no Sol afetaria o movi-

mento de Mercúrio. Dicke e H. M. Goldenberg realizaram uma série de medições em 1966 que mostravam uma diferença entre os raios equatorial e polar do Sol calculada em cerca de 0,04 segundo, diferença que embora pequena seria suficiente para produzir efeito significativo. De acordo com a teoria de Brans-Dicke, o avanço do periélio devido aos efeitos relativísticos seria de 39 segundos por século, sendo os 4 segundos restantes causados pelo achatamento dos pólos do Sol. Dicke assinalou que suas observações favoreciam a teoria escalar-tensorial contra a Relatividade Geral.

Observações feitas em 1973 pelo Professor H. Hill e seus colaboradores mostraram que a diferença nos raios correspondia a cerca de um quinto do valor encontrado por Dicke, pequena demais para produzir os efeitos previstos pela teoria de Brans-Dicke. Embora ainda muito sujeito a dúvidas na interpretação das observações, sente-se que geralmente a Relatividade Geral superou aquele desafio particular e emergiu incólume. Contudo, as teorias escalares-tensoriais não estão excluídas no atual estado de nossos conhecimentos.

Uma espécie de teoria inteiramente diferente, baseada essencialmente no Princípio de Mach e afirmando que as influências de distantes partes do Universo são importantes localmente, foi proposta em 1964 e sob uma forma modificada em 1971 por Sir Fred Hoyle e J. V. Narlikar. A teoria fundamentava-se no conceito de que a massa de uma partícula é determinada pela ação de partículas distantes; na formulação final foi introduzida a idéia de que partículas distantes poderiam proporcionar uma contribuição positiva ou negativa à massa de uma partícula local. Se o Universo consistia de regiões, ou "agregados", onde a contribuição à massa era positiva e agregados onde a contribuição era negativa, então em um limiar onde contribuições positivas e negativas neutralizassem as partículas teria massa zero.

Com a passagem do tempo, as linhas-mundo dessas partículas (e em vez de "partículas" poderíamos ler igualmente bem "galáxias") levariam além desse limite, resultando daí que o efeito líquido das contribuições à massa, positivas e negativas, não mais se neutralizaria e *as massas das partículas aumentariam*. Uma vez que o raio de um átomo é determinado pelas massas de suas partes constituintes, um aumento em sua massa levaria a uma redução de suas dimensões. Hoyle argumenta que se a unidade fundamental da escala, o átomo, estivesse

encolhendo, então as distâncias entre as galáxias *pareceriam* estar aumentando, muito embora elas pudessem realmente estar permanecendo constantes. Uma linha de argumentação similar – segundo a qual não poderíamos distinguir, por um lado, entre um Universo em expansão com G decrescente e, por outro lado, os efeitos dos átomos encolhendo – foi discutida nos anos 40 por E. A. Milne.

A teoria de Hoyle-Narlikar explica os desvios para o vermelho observado nas galáxias distantes como uma conseqüência da alteração de massa dos átomos. Quanto mais baixa a massa de uma espécie particular de átomo, maior o comprimento de onda da radiação que ele emitiria. Considerando grandes distâncias, estamos olhando para trás, para a era nas quais os átomos tinham menos massa do que hoje e sua radiação, que estamos recebendo no presente desses átomos distantes, tem comprimento de onda maior do que a radiação emitida pelas mesmas espécies de átomos localmente. Em outras palavras, átomos progressivamente mais distantes exibem um desvio para o vermelho progressivamente maior.

Esta teoria radical e inconvencional sugere que o Universo é vastamente maior em extensão do que podemos observar e acha-se em oposição direta à opinião convencional de que o Universo começou em uma singularidade há um tempo finito. A teoria implica também que não podemos receber radiação diretamente de galáxias que podem existir além de um limite no qual as partículas possuem massa zero, porque tais partículas absorveriam fortemente essa radiação. Entretanto, argumentam Hoyle e Narlikar, as partículas reemitiriam radiação, que nos pareceria uma radiação de fundo! Embora nova e fascinante, a teoria de Hoyle-Narlikar está muito afastada – pelo menos no presente – da principal corrente de pensamento a respeito da natureza da gravitação e não recebeu muito apoio.

Embora representem uma opinião minoritária, as teorias que sugerem que a gravidade pode variar com o tempo acham-se sob ativa consideração no momento. Na maior parte das teorias o índice da variação de G acha-se diretamente relacionado com o índice de expansão do Universo que – de acordo com as estimativas correntes da constante de Hubble – estaria entre cinco e dez partes em 10^{11} por ano, um pequeno índice de alteração.

Como podemos avaliar se G está ou não mudando? Se G foi maior

no passado, as órbitas da Lua ao redor da Terra e da Terra ao redor do Sol teriam sido menores no passado do que são agora; em outras palavras, à medida que a força da gravidade diminuiu as órbitas lentamente se teriam expandido. Da mesma forma, o movimento angular médio dos corpos em suas órbitas teria diminuído com o tempo. A computação e a medida de tais efeitos são complicadas pelas interações gravitacionais entre a Terra e a Lua, que atua como um freio na rotação da Terra, fazendo o comprimento do dia aumentar e a Lua afastar-se lentamente da Terra, com o aumento resultante no período orbital lunar. Estimativas recentes indicam que o aumento no período orbital devido a essa interação sobe a 10 a 15 partes por 10^{11} ao ano. A análise de antigos eclipses – alterações no período lunar e na duração do dia afetarão os lugares e os tempos em que os eclipses foram observados – por P. Muller, do Laboratório de Jatopropulsão da NASA, e F. R. Stephenson, da Universidade de Newcastle (Inglaterra), indicam, de acordo com os cálculos de Muller, que o índice médio da recessão da Lua é de 4,4 cm por ano: durante o período de 2.700 anos investigados, a Lua sofreu uma recessão de cerca de 100 m e o comprimento do dia solar médio aumentou em cerca de 0,05 segundos.

Nos últimos anos, novas técnicas permitiram a realização de medições muito mais precisas. Em particular, existe a técnica do laser, pela qual uma distância muito precisa até um ponto situado na superfície lunar pode ser estabelecida mediante a reflexão de um feixe de laser em refletores especialmente planejados ali deixados com esse propósito pelos astronautas da Apolo. Da mesma forma, os feixes de radar podem ser refletidos pelas superfícies dos planetas, permitindo que as distâncias sejam determinadas com precisão. O grande benefício desta técnica é que a precisão aumenta rapidamente com o comprimento do tempo durante o qual tais observações são realizadas. Os valores do índice de recessão da Lua obtidos por este meio acham-se em torno de 3,5 cm por ano.

A dificuldade quanto a obter a medida das variações temporais de G é que, até recentemente, nossos padrões básicos da medição do tempo baseava-se na própria G. O primeiro relógio natural usado pelo homem foi a rotação da Terra sobre seu eixo; mas isto não representa uma variação constante. Um padrão mais uniforme para a medição do tempo é o *tempo das efemérides*, baseado no movimento orbital da Terra ao redor do Sol, sendo o ano chamado com este propósito "ano

tropical" e contendo 365,2422 dias, cada um deles compreendendo 86.400 segundos.

O período orbital da Terra depende de *GM*, constante gravitacional multiplicada pela massa do Sol. Se G estivesse diminuindo, o período orbital da Terra diminuiria exatamente na proporção correta para evitar a detecção de efeitos devidos à variação de G; se o período orbital da Terra estivesse aumentando, o ano, por definição, ainda conteria o mesmo número de segundos efemérides, mas os "segundos" seriam mais longos. O aumento no período orbital da Lua estaria na mesma proporção que o aumento orbital da Terra e assim seria indetectável.

Em 1º de janeiro de 1958 um novo padrão de medida do tempo foi adotado, independente da rotação da Terra e do movimento da Terra ao redor do Sol – o *tempo atômico*. Esta escala de tempo está baseada na freqüência de uma particular transição de átomos do elemento césio, freqüência de 9.192.631.770 Hertz (vibrações por segundo). Nessa base o tempo pode ser medido e regulado com uma precisão de uma parte para 10^{12}. Os relógios atômicos desenvolvidos em seguida podem melhorar esta precisão, por período limitado, de um fator de 1.000.

Usando o tempo atômico como seu padrão, T. Van Flandern, do Observatório Naval do Reino Unido, e outros, analisaram dados de 20 anos de ocultações lunares. À medida que a Lua se move ao redor da Terra passa diante de numerosas estrelas, bloqueando sua luz temporariamente; tal evento é denominado ocultação. Se a posição da Lua é calculada na suposição de que G é constante, então, em princípio, deveria ser possível prever o tempo de uma ocultação com grande precisão, mas se G está diminuindo, as ocultações deveriam ocorrer mais tarde do que o previsto, em virtude do retardamento do movimento angular da Lua. Os resultados de Van Flandern indicam que o período orbital da Lua está aumentando, como resultado de todas as causas, em torno de 22 partes em 10^{11} por ano. Isso parece representar um índice maior do que o previsto pelo nosso presente conhecimento da interação gravitacional e Van Flandern interpreta isto como um indicador de uma diminuição de G em torno de 3,6 partes em 10^{11} por ano, admitindo que G é a única "constante" que está mudando. Se outras unidades básicas de massa, comprimento e tempo estão mudando, o índice de variação de G seria duplo, cerca de 7,2 partes em 10^{11} por ano.

Diante disso, esses resultados parecem estar amplamente de acordo com o índice de expansão do Universo, mas os possíveis erros são grandes e ninguém pode estar seguro de estar estimando precisamente todos os fatores que afetariam o movimento da Lua. Além da interação gravitacional, outros fatores são os efeitos de vento solar, a passagem de cometas relativamente próximos até – como assinalou C. Doake, do Scott Polar Institute (Cambridge) – as quantidades variáveis de gelo contido nas calotas polares da Terra.*

As experiências lunares com laser determinam a recessão da Lua com respeito ao tempo atômico, enquanto os resultados de Muller, baseados em antigos eclipses, medem essa recessão no tocante ao tempo gravitacional (efeméride). Os resultados de Muller parecem indicar uma taxa de recessão da Lua cerca de 25 por cento maior do que a obtida pelas experiências com laser. Isto indicaria uma mudança em G? Talvez sim, mas por outro lado L. Morrison e C. Ward, do Observatório Real de Greenwich, analisaram os trânsitos do planeta Mercúrio através do disco do Sol entre 1677 e 1973 e obtiveram um índice de recessão em torno de 3,8 cm por ano, estreitamente similar aos valores obtidos com laser, embora esses resultados fossem baseados no tempo gravitacional. Entretanto, esses dados não conferiam muito com os dados obtidos até agora com os eclipses e a questão permanece aberta, embora a opinião geral até o momento é que qualquer mudança em G deve ser menos do que uma parte em 10^{11} por ano.

As conseqüências da gravidade variável abrangeriam a lenta expansão da Terra e de outros planetas e isto foi invocado como um possível mecanismo para iniciar o crescimento dos continentes e processos da deriva continental. Por outro lado, tais processos podem ser explicados adequadamente sem introduzir a gravidade variável. A Terra poderia ter estado mais próxima do Sol e portanto, de acordo com as idéias convencionais, mais quente do que no momento. Como foi assinalado por E. Teller, uma mudança em G afetaria o interior do Sol de tal forma que este teria sido muito mais luminoso no passado: por este raciocínio, os oceanos teriam estado em ebulição, mantendo-se todos os outros fatores iguais, ainda há 600 milhões de anos. Isto não confere com os registros geológicos e biológicos.

Entretanto, outros argumentaram que o Sol teria estado *mais*

* A quantidade de gelo nas calotas polares afeta muito ligeiramente a distribuição da massa da Terra a qual, por sua vez, afeta a interação gravitacional com a Lua.

frio no passado se a gravidade fosse mais forte e V. M. Canuto, do Centro de Vôo Espacial Goddard, da NASA, assinalou que as equações de Newton e Einstein exigem que G seja constante. Se G variar, então para manter G*M* constante *M* teria de variar. Se este fosse o caso, todas as leis usadas para calcular o efeito da gravidade variável sobre a luminosidade do Sol seriam errôneas. Por isso, afirma ele, não é razoável excluir a gravidade variável com base em argumentos convencionais que, embora calculando os efeitos de G variável, não obstante admitem tacitamente que G é constante!

Juntamente com S. H. Hsieh e P. J. Adams ele formulou uma teoria que permite a existência de dois tipos de equações de Einstein (relativísticas): a primeira, que seria válida somente quando o tempo gravitacional fosse usado, incorpora G*M* como uma constante, enquanto a segunda, a ser usada com a escala do tempo atômico, permite a G variar mesmo se *M* permanecer constante; neste último caso G*M* *não* seria constante. Os tempos medidos com base nas escalas gravitacional e atômica estariam ligados por uma quantidade que por ela mesma varia com o tempo; dependendo do valor dessa quantidade, os relógios atômicos acelerariam ou se retardariam com relação aos relógios gravitacionais à medida que a idade do Universo aumentasse. Com efeito, esta grandeza variável relacionaria os fenômenos atômicos com os fenômenos gravitacionais em grande escala.

Canuto sente, como outros, inclusive Dirac, que o fato da força eletromagnética entre dois elétrons ser maior do que a força gravitacional de um fator em torno de 10^{40} está relacionado com a idade do Universo. Se a proporção sempre tivesse tido esse valor, então por que este valor particular e não outro qualquer? Por que deveria a diferença ser tão grande? Pode ser, naturalmente, que as várias constantes e forças tenham os valores que têm justamente por que, por acaso, eram esses os valores que tinham quando o Universo se originou e nunca seremos capazes de saber por quê. Isto parece insatisfatório. Talvez num instante inicial as duas forças tivessem a mesma intensidade e tenham desde então atingido seus valores presentes em conseqüência da expansão ou envelhecimento do Universo. Se esta hipótese estiver correta, então deveria ser possível formular uma teoria particular com base na qual poderiam ser feitas previsões definidas das proporções das diferentes forças em diferentes épocas.

Apesar dos argumentos apresentados acima, deve-se enfatizar que no momento a idéia da gravidade variável ou G declinando em proporção à expansão do Universo não é geralmente aceita.

Forças unificadas?

RECONHECEMOS HOJE a existência de quatro forças na natureza, sendo elas as interações nucleares forte e fraca, descobertas no século XIX, e as forças gravitacional e eletromagnética, as quais, sob certo aspecto, são conhecidas há longo tempo. As relativas intensidades dessas forças são fornecidas no Quadro 3.

A unificação das forças foi um tema repetitivo na física durante o século passado. Como vimos no Capítulo 4, durante o século XIX Maxwell demonstrou que as forças elétrica e magnética eram manifestações de uma força comum, a força eletromagnética. Einstein tentou sem êxito desenvolver uma "teoria do campo unificado" que reuniria as forças da gravidade e do eletromagnetismo em uma teoria abrangendo tudo, mas a teoria eletromagnética continuou a obter grandes sucessos quando foi adaptada aos princípios da mecânica quântica na teoria da eletrodinâmica quântica.

Em 1967 S. Weinberg, de Harvard e A. Salam, do Colégio Imperial, em Londres, assim como o Centro Internacional de Física Teórica em Trieste, Itália, desenvolveram independentemente uma teoria que unificou a força eletromagnética e a interação nuclear fraca, propondo que se tratavam de manifestações da mesma força. Esta assertiva foi confirmada por numerosos resultados experimentais. Por exemplo, entre as previsões da teoria acha-se uma que afirma que os elétrons que interagem com os prótons demonstrarão uma ligeira preferência pelas interações "à direita" ao invés daquelas "à esquerda", de tal forma que o índice de interações envolvendo elétrons girando para a direita diferiria do índice envolvendo elétrons girando para a esquerda. Tais efeitos foram observados e demonstraram que nesta situação a natureza viola a paridade ("a lei" de que não existe qualquer distinção entre as propriedades do lado direito e do lado esquerdo das quantidades e interações na natureza).

Como a interação nuclear forte é descrita nos termos de um tipo de teoria similar, há otimismo a respeito de que ela também seja incluída, deixando apenas a gravidade ainda de fora.

Quadro 3 As forças da Natureza

Força	Intensidade da força (dois prótons)	Alcance	Condutor da força
Interação nuclear forte	1	10^{-15} metros	glúon* méson†
Interação	10^{-2}	longo	Fóton
Interação nuclear fraca	10^{-5}	10^{-17}	bóson vetor intermediário
Gravitação‡	10^{-39}	longa	gráviton

*O glúon é a partícula condutora de força trocada entre os quarks que mantêm juntos grupos de quarks que constituem bárions (por exemplo, prótons e nêutrons) e mésons.

† A interação nuclear forte entre os hádrons (bárions e mésons) é comunicada pelo intercâmbio de mésons, mas estes são compostos de quarks unidos pelos glúons.

‡ A gravitação é a única força que é sempre de atração.

Grandes teorias unificadas

AS TEORIAS que tentam reunir as interações forte, fraca e eletromagenética são conhecidas como grandes teorias unificadas, um termo que é abreviado, de uma forma um tanto irreverente, para GTU. Várias teorias acham-se sendo estudadas, sendo a premissa básica de que uma força original evoluiu em manifestações separadas. A análise das grandes teorias unificadas realizada por M. Yoshimura, da Universidade Tohoku, do Japão, sugere um processo natural pelo qual a dominância da matéria sobre a antimatéria pode ter emergido na Grande Explosão e leva à previsão de que a proporção entre o número de fótons e o número de prótons no Universo deve ser cerca de 10^9 :1, um número que se situa dentro da faixa das estimativas atuais.

Como observamos anteriormente, partículas "pesadas" como prótons, antiprótons, nêutrons e antinêutrons são conhecidas como *bárions* e associadas a elas existe uma quantidade chamada *número bárion*, que pode assumir os valores + 1 (por exemplo, no que se refere aos prótons) ou – 1 (por exemplo, no tocante aos antiprótons). As partículas mais

leves, tais como os elétrons, possuem número bárion zero. Uma das mais bem comprovadas leis da física de hoje é a conservação do número bárion: em qualquer interação envolvendo os bárions, o número bárion deve ser preservado; por exemplo, se três partículas de número bárion + 1, + 1 e – 1 estiverem envolvidos em uma interação mútua, qualquer coisa que emerja desse processo teria um número bárion de + 1. Em conseqüência desta lei é que os prótons não podem desintegrar-se em partículas mais leves e radiação, porque assim fazendo eles destruiriam o número bárion. Por isso foi admitido que os prótons são sempre estáveis.

Entretanto, os buracos negros parecem violar esta regra, particularmente se realmente irradiam igual número de partículas e antipartículas como o processo de Hawking indica. No tocante a um buraco negro formado inteiramente de partículas (nenhuma antipartícula presente no material do qual ele se formou), deve ser "processado" igual número de partículas e antipartículas. Assim uma massa de material inicialmente possuidora de um número bárion positivo e muito grande deveria terminar com um número bárion de zero.

A meia-vida de um próton – isto é, o tempo necessário para 50 por cento de uma amostra de prótons desintegrar-se – deve ser maior do que 10^{30} anos para que a ocasional desintegração de um deles não tenha sido observada até hoje. As teorias correntes sugerem que a meia-vida pode estar na vizinhança de 10^{34} anos e uma experiência está sendo feita para tentar detectar a desintegração prevista. Um grupo de pesquisadores das universidades da Califórnia e Michigan, assim como do Bookhaven National Laboratory, instalaram um gigantesco saco plástico contendo cerca de 10.000 toneladas de água ultrapura a uma profundidade de 600 m em uma mina de sal próxima a Cleveland. Circundado por detectores para medir qualquer reação emitida pela desintegração dos prótons, o bolsão plástico está localizado no subsolo para minimizar o número de acontecimentos inesperados oriundos, por exemplo, dos raios cósmicos. Mesmo em se tratando de uma tão grande massa de água, a maior parte dos experimentadores pode ter a esperança de detectar algumas centenas de desintegrações de prótons por ano se as teorias atuais estiverem corretas. Se a experiência produzir resultados positivos, proporcionará uma importante confirmação de que os físicos estão no caminho certo em suas tentativas para unificar três das quatro forças – e aumentarão a convicção de que a gravidade também deverá eventualmente encaixar-se em uma estrutura unificada.

AS INTERAÇÕES nucleares forte e fraca, assim como a força eletromagnética, podem, separadamente ou sob uma forma unificada, ser descritas em termos das teorias quânticas de campo, isto é, teorias que incorporam os princípios da Relatividade Especial e da mecânica quântica: a Relatividade Especial contribui com a equivalência da massa e da energia; a mecânica quântica injeta as idéias de unidades individualizadas de energia e do princípio da incerteza. As modernas teorias quânticas de campo envolvendo estas três forças são do tipo conhecido como de calibre, sendo as próprias forças descritas em termos da troca de partículas entre partículas interatuantes. As partículas trocadas são conhecidas como partículas "virtuais" porque não podem ser vistas diretamente e só existem transitoriamente.

Como uma analogia (que não deve ser levada longe demais) podemos visualizar como o processo opera pensando em dois atletas correndo em trajetórias convergentes, um deles carregando uma pesada *medicine ball* (Fig. 51). Quando chegam bem próximos um do outro, ele

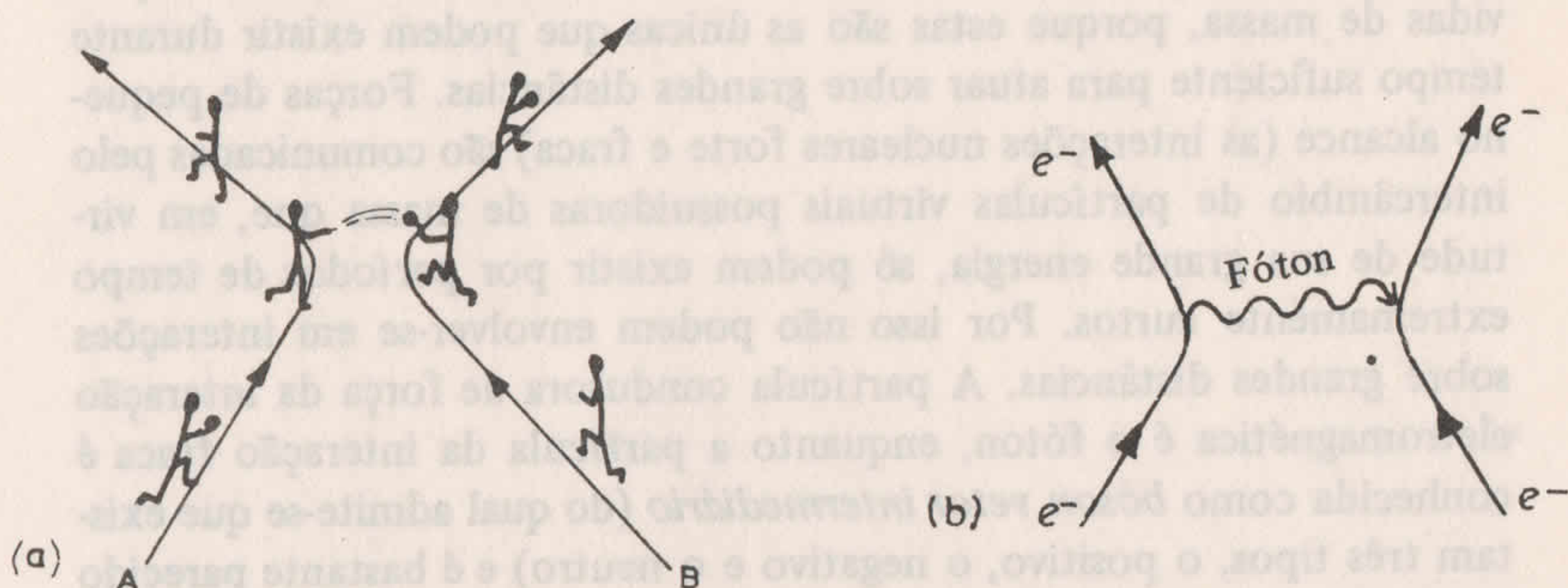



Fig. 51 Diagrama de Feynman. *(a) As modernas teorias de campo quânticas sobre as interações nucleares fraca e forte e a interação eletromagnética abrangem forças que são comunicadas pelo intercâmbio de partículas "virtuais". A analogia é obtida através de um par de atletas cujas trajetórias convergentes passam a divergir após a troca de uma pesada* medicine ball *de um para o outro. Similarmente (b), em um diagrama de Feynman sobre a interação eletromagnética, dois elétrons de carga semelhante (*e^-*) se aproximam e são repelidos pela troca de um fóton, que se materializa por um período infinitesimal para comunicar a interação.*

atira sua bola para o outro e em conseqüência os atletas são afastados. Exemplificando, a interação eletromagnética entre duas partículas de carga semelhante pode ser visualizada desta mesma forma: à medida que os elétrons, digamos, se aproximam um do outro, eles trocam entre si uma partícula – neste caso um fóton desprovido de massa – e o resultado da interação é a repulsão mútua. Um processo do mesmo tipo pode ser descrito nos termos de um diagrama de Feynman. O fóton virtual trocado só existe durante um microscópico intervalo de tempo; se ele existe decorre do princípio da incerteza, pelo qual é impossível saber a precisa quantidade de energia contida em um sistema microscópico durante um período de tempo indefinidamente curto. Por conseguinte, a mecânica quântica permite que uma partícula de determinada energia se materialize por um breve instante; quanto maior a energia da partícula, mais curto o intervalo de tempo durante o qual ela pode existir. Vemos este tipo de processo em ação quando consideramos a forma pela qual as partículas podem ser criadas na vizinhança de um buraco negro (Capítulo 9).

Encaradas deste ponto de vista, forças de longo alcance como a força eletromagnética só podem ser comunicadas por partículas desprovidas de massa, porque estas são as únicas que podem existir durante tempo suficiente para atuar sobre grandes distâncias. Forças de pequeno alcance (as interações nucleares forte e fraca) são comunicadas pelo intercâmbio de partículas virtuais possuidoras de massa que, em virtude de sua grande energia, só podem existir por períodos de tempo extremamente curtos. Por isso não podem envolver-se em interações sobre grandes distâncias. A partícula condutora de força da interação eletromagnética é o fóton, enquanto a partícula da interação fraca é conhecida como *bóson vetor intermediário* (do qual admite-se que existam três tipos, o positivo, o negativo e o neutro) e é bastante parecido com o fóton, porém com massa finita. A interação forte entre as partículas nucleares é comunicada pelos *mésons*, sendo essa interação uma manifestação da força mais fundamental que une os quarks para produzir partículas tais como os prótons, os nêutrons e os mésons; a partícula condutora de força neste último caso é o *glúon*. Provavelmente, pode-se esperar que uma teoria quântica da gravitação opere da mesma maneira, sendo a interação comunicada por partículas desprovidas de massa chamadas *grávitons*.

Um aspecto característico das diferentes famílias de partículas é a propriedade do *spin* – podemos visualizar as partículas como girando

sobre um eixo embora devamos levar em conta que as partículas subatômicas e nucleares não são realmente como pequenas bolas de bilhar. As unidades de spin são tais que partículas familiares como os elétrons, os prótons e os nêutrons têm valores de spin de 1/2 e partículas desprovidas de massa como os fótons possuem spin = 1. As partículas trocadas nas interações fraca, forte e eletromagnética conduzem a spin = 1, cada uma delas, o que resulta na repulsão entre partículas semelhantes (por exemplo, dois elétrons) e na atração entre partículas diferentes (por exemplo, um próton e um elétron). Considera-se que os grávitons tenham spin = 2, desde que *todas* as interações envolvendo o intercâmbio de partículas com spin = 2 resultariam em atração.

Embora admita-se que uma teoria quântica da gravidade envolverá o intercâmbio de grávitons, ainda não existe qualquer teoria que funcione. Entretanto, um desenvolvimento promissor é a *supergravidade*, uma teoria formulada pela primeira vez em 1976 por D. A. Freedman, P. van Niewenhuizen e S. Ferrara e, independentemente, por S. Deser e B. Zumino. Na supergravidade, existe um tipo singular de partícula, uma *superpartícula*, que pode aparecer sob vários disfarces como qualquer tipo de partícula condutora de força, ou como um quark ou lépton (uma partícula "leve", tal como um elétron) assim ligando o gráviton a todos os outros campos de partículas. Nesta abordagem é possível começar com conceito de um gráviton de spin-2 e construir uma teoria da gravitação onde quer que partículas materiais sejam influenciadas, pelo intercâmbio de grávitons virtuais, de acordo com as equações de Einstein da Relatividade Geral.

A força de gravidade de longo alcance é comunicada pelo intercâmbio de grávitons desprovidos de massa com spin-2. A supergravidade exige também que existam partículas com massa e spin 3/2, ou *gravitinos*. Os efeitos do intercâmbio de gravitinos só se tornará aparente em se tratando de um alcance muito curto, onde eles produziriam modificações na Relatividade Geral.

Uma analogia grosseira do comportamento de uma superpartícula pode ser obtida pensando-se nela em termos de dados. Dependendo de como é "girado", um dado assume diferentes valores de 1 a 6. Da mesma forma, "girando" uma superpartícula podemos chegar a todos os tipos de partículas existentes no Universo. Através de progressivas transformações podemos ir de um gráviton de *spin*-2 até um gravitino de *spin* 3/2, passando por partículas de spin-1 como fótons até partículas de *spin* 1/2 como os elétrons e os prótons, e final-

mente chegando às partículas desprovidas de *spin*. A teoria não explica ainda todas as partículas no mundo real, nem suas massas diferentes, mas promete bastante.

Testes complementares da Relatividade Geral

EMBORA ESTES vários avanços teóricos prossigam, permanece o fato de que a Relatividade Geral – uma clássica teoria de campo, tratando a gravitação em termos da curvatura do espaço-tempo – é altamente bem-sucedida. Nos últimos anos os experimentadores têm desenvolvido novos testes, mais minuciosos, para fortalecer suas previsões em comparação com as de seus rivais.

Para ser viável, uma teoria alternativa da gravitação deve satisfazer o princípio fraco da equivalência – segundo o qual todos os corpos, qualquer que seja a sua massa ou composição, experimentam a mesma aceleração em um dado campo gravitacional. Isto foi confirmado com uma precisão de uma parte em 10^{12} em experiências como as realizadas pelos físicos soviéticos V. B. Braginsky e V. Panov. A Relatividade Geral satisfaz o princípio forte da equivalência segundo o qual todos os laboratórios não giratórios em queda livre são totalmente equivalentes para o desempenho das experiências, onde quer que o laboratório possa estar localizado no Universo e em qualquer tempo. Nenhuma das teorias competidoras incorpora esta exigência: de acordo com algumas delas pode haver efeitos da "estrutura preferida" e/ou da "localização preferida". As primeiras implicariam que o movimento de um laboratório comparado com o referencial constituído pelas galáxias afetaria os resultados das experiências gravitacionais realizadas dentro desse laboratório, enquanto as últimas implicariam que a estreita proximidade de um corpo de grande massa produziria efeitos discerníveis dentro de um laboratório em queda livre, ao contrário do princípio da equivalência forte. Os testes realizados já colocaram limites sobre tais efeitos.

Outro aspecto no qual as teorias competidoras diferem é na quantidade de curvatura do espaço-tempo que elas prevêem mas predizem será produzida por uma determinada quantidade de matéria (já vimos como a teoria de Brans-Dicke prevê um valor diferente para o avanço do periélio de Mercúrio, sendo esse efeito devido ao grau de curvatura do espaço-tempo presente na vizinhança do Sol). O grau de curvatura da luz pelo Sol é um teste capaz de determinar a quantidade de curvatura

do espaço-tempo presente. Outro efeito, não previsto por Einstein mas descoberto como uma conseqüência da Relatividade Geral por I. I. Shapiro em 1964, é o período de tempo que ocorre no eco do radar a partir de um alvo de onde o feixe passa próximo à borda do Sol; isso também depende do grau de curvatura do espaço-tempo. As experiências realizadas com crescente precisão desde 1968 por Shapiro e outros, usando as reflexões do radar a partir de planetas e sinais liberados pelas sondas Viking em órbita ao redor de Marte, concorda muito estreitamente com as previsões da Relatividade Geral.

A curvatura da luz e o atraso do radar, ao serem medidos, confirmam que a quantidade de curvatura do espaço-tempo na vizinhança do Sol concorda com as previsões da teoria de Einstein até cerca de 1 por cento. Isto significa que qualquer teoria alternativa viável tem de concordar a este respeito com a Relatividade Geral pelo menos até este grau de precisão.

A Relatividade Geral sobreviveu a todos os testes a que foi submetida até agora mas, embora estes coloquem limitações às teorias alternativas, e já temos quase eliminado algumas delas, permanece o fato de que muitas destas teorias são viáveis e mais testes são necessários para descobrir todas as falhas das teorias gravitacionais.

Ondas gravitacionais

A MAIS PROMISSORA direção das investigações realizadas no momento é a busca das ondas gravitacionais. Se uma carga elétrica é submetida a uma oscilação, emitirá ondas eletromagnéticas, como Maxwell previu e Hertz confirmou. Como a Relatividade Geral é uma teoria de campo similar à teoria eletromagnética (pelo menos em seu aspecto original), parece razoável supor que massas oscilantes produzirão perturbações ondulatórias no campo gravitacional — isto é, ondas gravitacionais — que deverão viajar através do espaço à velocidade da luz: se o Sol fosse aniquilado, levaria cerca de 8,3 minutos antes da Terra deixar de "sentir" a influência gravitacional do Sol.

Embora as teorias viáveis da gravitação prevejam a existência de ondas gravitacionais, elas atribuem diferentes propriedades às mesmas; em algumas teorias a velocidade de propagação poderia diferir da propagação da luz. A detecção de ondas gravitacionais e a análise

e suas propriedades proporcionariam um teste crucial das teorias gravitacionais.

As propriedades esperadas das ondas gravitacionais, de acordo com a Relatividade Geral, diferem sob numerosos aspectos das propriedades das ondas eletromagnéticas; por exemplo: como a gravitação é muito mais fraca do que a força eletromagnética, essas ondas devem ser muito mais fracas do que as ondas eletromagnéticas. Espera-se que elas afetem a matéria de forma diferente também. Se uma onda eletromagnética passasse através de uma nuvem de elétrons, iria fazer com que todos eles se movessem para cima e para baixo em uníssono, tal como as partículas de água se movem quando uma onda de água passa por elas, mas uma onda gravitacional passando através dessa mesma nuvem distorceria a mesma da forma mostrada na Fig. 52. Se uma onda gravitacional passasse perpendicularmente através desta página, a página se tornaria mais longa e estreita e logo em seguida mais curta e larga.

Acredita-se que todas as massas em aceleração emitam ondas gravitacionais: se você pular para cima e para baixo emitirá ondas gravitacionais, embora sejam fracas demais para que se tenha qualquer perspectiva de medi-las! Os corpos em órbita em torno um do outro estão continuamente acelerando; mas, se considerarmos o caso de um típico binário constituído de duas estrelas de massa solar separadas por uma unidade astronômica, o débito energético em ondas gravitacionais seria menor do que 1 centésimo bilionésimo do débito da radiação eletromagnética das estrelas consideradas. É claro que temos de considerar fontes mais exóticas para ter esperança de detectar substanciais quantidades de radiação gravitacional. Binários muito próximos envolvendo anãs brancas, estrelas nêutrons ou buracos negros oferecem fontes potenciais progressivamente melhores e outras boas perspectivas abrangem o colapso estelar para formar buracos negros, supernovas — particularmente onde a explosão é assimétrica — e eventos como os buracos negros nos aglomerados globulares, nos núcleos galáticos e nos quasares.

Uma maneira fácil de caracterizar a intensidade de uma onda gravitacional é examinar quanto (Δl) é a separação (l) de um par de partículas quando uma onda incide em ângulo reto sobre a linha de união, desde que a distâncias moderadas a grandeza $\Delta l/l$ permaneceria a mesma qualquer que fosse a separação das partículas. Em se tratando de eventos reais, estas alterações são pequenas: o colapso de uma estrela

(a) 1 2 3 4 5

Onda eletromagnética

$l+\Delta l$ l

(b) 1 2 3 4 5

Onda gravitacional

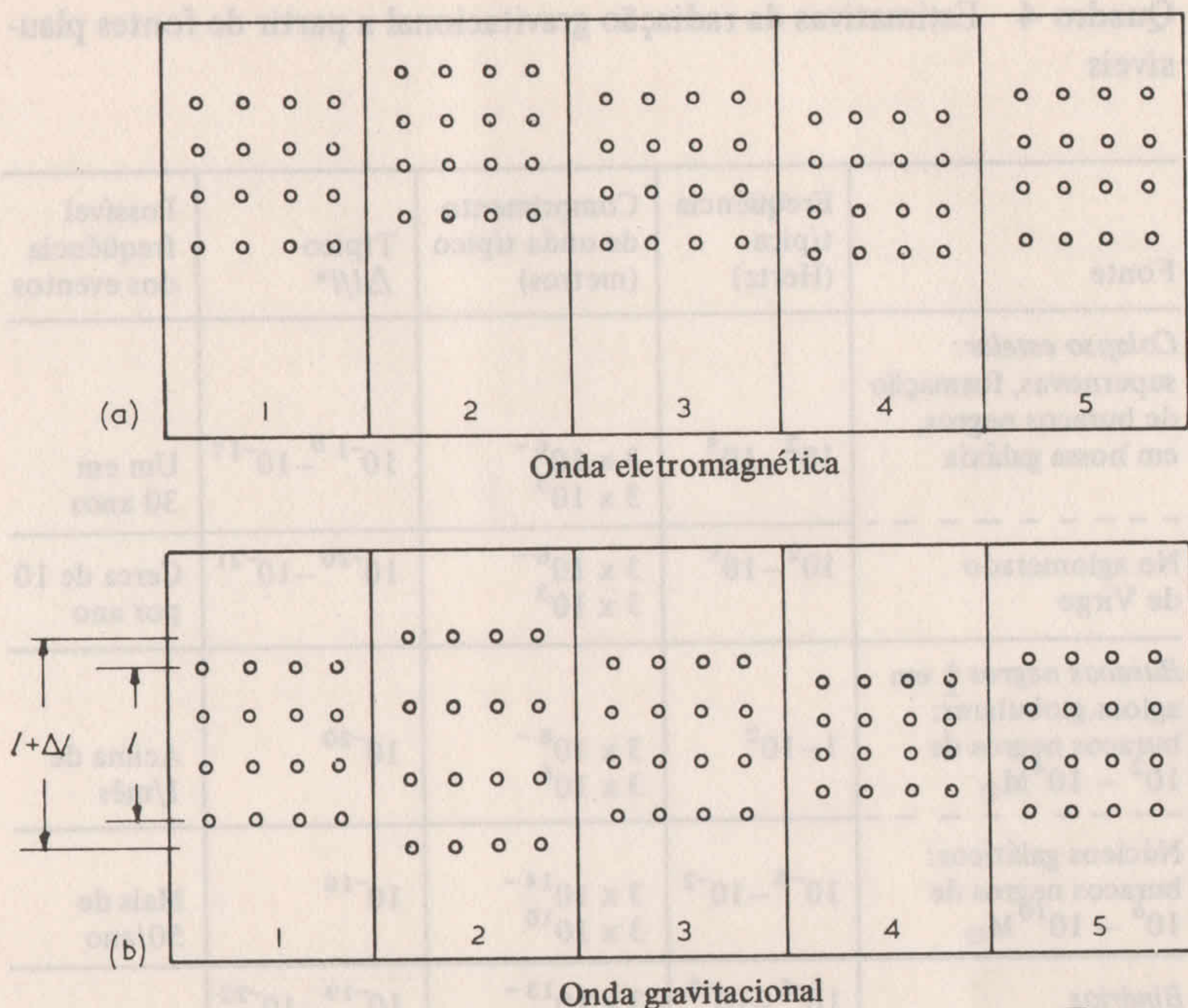



Fig. 52 Os efeitos das ondas eletromagnéticas e gravitacionais passando através de uma nuvem de elétrons. (a) *Quando uma onda eletromagnética passa através deles, os elétrons se movem para cima e para baixo. O grupo 1 representa a situação no início de 1 ciclo da onda, os grupos 2, 3 e 4 mostram a situação após 1/4, 1/2 e 3/4 de um ciclo.* (b) *Uma onda gravitacional faz os elétrons se moverem em relação um ao outro. Após 1/4 de ciclo (grupo 2) eles são afastados em um plano vertical e comprimidos no plano horizontal; após 1/2 de ciclo voltam a sua disposição original antes de terem sido distendidos na direção horizontal e espremidos na direção vertical ao chegarmos a 3/4 de ciclo (grupo 4).*

em nossa galáxia deveria fornecer um valor para $\Delta l/l$ de uma parte em 10^{17} até uma parte em 10^{19} – e tais eventos provavelmente ocorrem em média somente uma vez a cada 30 anos ou algo assim. Um par de partículas distanciadas de um metro deveria ser desviado por tal evento através de uma distância menor do que o tamanho de uma partícula nuclear; mesmo um par de satélites artificiais separados de 1 milhão de

Quadro 4 Estimativas da radiação gravitacional a partir de fontes plausíveis

Fonte	Freqüência típica (Hertz)	Comprimento de onda típico (metros)	Típico $\Delta l/l$*	Possível freqüência dos eventos
Colapso estelar: supernovas, formação de buracos negros, em nossa galáxia	$10^2 - 10^5$	3×10^6 – 3×10^3	$10^{-18} - 10^{-17}$	Um em 30 anos
No aglomerado de Virgo	$10^2 - 10^5$	3×10^6 – 3×10^3	$10^{-20} - 10^{-21}$	Cerca de 10 por ano
Buracos negros † em aglom. globulares: buracos negros de $10^2 - 10^4 M_\odot$	$1 - 10^2$	3×10^8 – 3×10^6	10^{-20}	Acima de 1/mês
Núcleos galáticos: buracos negros de $10^6 - 10^{10} M_\odot$	$10^{-6} - 10^{-2}$	3×10^{14} – 3×10^{10}	10^{-16}	Mais de 50/ano
Binários	$10^{-5} - 10^{-2}$	3×10^{13} – 3×10^{10}	$10^{-19} - 10^{-22}$	Contínuo
Exemplo específico, Iota Bootis	8.6×10^{-5}	3.5×10^{12}	5×10^{-21}	Contínuo

* A capacidade de detecçãode ondas gravitacionais pelos detectores atuais é cerca de $\Delta l/l = 10^{-16}$.

† Os números relacionam-se com acontecimentos com alcance de vários bilhões de anos-luz.

Os dados se baseiam em números fornecidos por D. H. Douglass e V. B. Braginsky em *General Relativity – An Einstein Centenary Survey*, editado por S. W. Hawking e W. Israel, Cambridge University Press, 1979.

quilômetros seria deslocado apenas cerca de 100 vezes o diâmetro de um átomo de hidrogênio. Os deslocamentos produzidos por várias possíveis fontes de ondas gravitacionais são apresentados no Quadro 4.

Possivelmente a mais esperançosa área de investigação seria constituída pelos eventos associados aos buracos negros de grande massa contidos nos núcleos galáticos e nos quasares; as estimativas feitas por K. Thorne e Braginsky sugerem que pode haver pelo menos 50 desses eventos por ano, produzindo um $\Delta l/l$ de cerca de 10^{-16}.

Vários tipos de detectores de ondas gravitacionais são possíveis. Talvez o mais simples seja uma barra de metal cujas extremidades oscilassem à medida que a onda gravitacional passasse através dela: medindo as tensões exercidas sobre a barra a onda gravitacional poderia, em princípio, ser detectada. Uma dada massa de um determinado tamanho de barra responderia mais favoravelmente a ondas de uma freqüência particular (isto é, ela ressoaria) – de um modo geral espera-se que as freqüências das ondas gravitacionais sejam muito baixas (de 10^{-3} Hz até cerca de 10^5 Hz) com comprimentos de onda correspondentemente longos (3×10^{11} m até 3.000 m, respectivamente).

O primeiro programa em larga escala para tentar detectar as ondas gravitacionais foi realizado pelo Professor J. Weber, da Universidade de Maryland, o qual, juntamente com seus alunos, construiu um detector constituído por um cilindro sólido de alumínio com cerca de 1,5 m de comprimento e pesando várias toneladas. A esse cilindro estão fixados medidores de tensão extremamente sensíveis capazes de detectar diminutas distorções no cilindro. Infelizmente, existem muitos eventos locais – mesmo alguns já passados – que poderiam fazer os sensores responder. Em vista disso, Weber construiu um segundo detector no Argonne National Laboratory, perto de Chicago, a cerca de 800 km de distância e argumentou que os mesmos eventos espúrios não podiam ser registrados simultaneamente por ambos os detectores; se ambos registrassem um evento no mesmo instante, afirmou ele, deveriam estar respondendo a genuínas ondas gravitacionais.

Em 1970 ele anunciou a detecção de ondas gravitacionais e localizou a fonte das mesmas em algum ponto na direção do centro da galáxia. Surgiu um problema: para seu primitivo detector ser capaz de registrar eventos deste alcance, a energia liberada pelo centro da galáxia sob a forma de ondas gravitacionais teria de ser estupenda – equivalente a vários milhares de supernovas, colapsos estelares ou eventos similares como a deglutição por um buraco negro atual com vários milhares de massas solares por ano. Os resultados pareciam altamente implausíveis, embora houvesse a possibilidade de que algum tipo de efeito de lente gravitacional pudesse concentrar a radiação no plano da nossa

galáxia, ao invés de permitir à mesma mover-se uniformemente para fora em todas as direções, de tal forma que o débito energético necessário para produzir seus resultados não teria de ser tão grande.

Outros grupos, em vários centros através do mundo, construíram outros detectores do tipo Weber, alguns deles mais sensitivos do que o original, mas todos falharam notavelmente em detectar qualquer onda gravitacional. Acredita-se hoje que Weber não detectou genuínas ondas gravitacionais, embora uma explicação alternativa de seus resultados não seja fácil de encontrar.

Se os números do Quadro 4 são todos precisos, os níveis plausíveis de radiação gravitacional acham-se abaixo da capacidade dos detectores existentes. Não obstante, o trabalho prossegue com entusiasmo e em numerosos centros através do mundo existe real otimismo de que dentro dos próximos 10 anos ou tanto tenhamos instrumentos capazes de fornecer a sensibilidade necessária para a nítida detecção de ondas gravitacionais. Seria singularmente apropriado se esta descoberta ocorresse na década do centésimo aniversário da experiência de Michelson-Morley, tricentésimo aniversário da publicação dos *Principia* de Newton.

Outros tipos de detectores atualmente sob investigação abrangem detectores de massa livre, onde duas ou mais massas são livres para se mover no espaço em relação uma a outra (é claro que experiências com massas *completamente* livres só poderiam ter lugar no espaço; massas "quase livres" podem ser obtidas em laboratório utilizando pêndulos) e detectores de ressonância, a mais simples forma dos quais seria constituída por duas massas ligadas por um fio; tal como qualquer fio, cada detector teria uma particular freqüência de ressonância.

O ruído de fundo é um problema que pode ser reduzido aumentando as massas dos detectores e reduzindo a temperatura do aparelho experimental até próximo do zero absoluto. Gigantescos cristais isolados de safira ou silicone constituem uma considerável promessa para funcionar como detectores.

Detectores de longo alcance também são encarados com otimismo. Em essência eles se baseiam na medição do deslocamento de dois espelhos com relação a uma massa de referência. Curvando a trajetória da luz por meio de múltiplas reflexões entre os aparelhos permite sua efetiva separação e por isso o comprimento efetivo do detector ser grandemente aumentado. Com espelhos adequados podemos obter mais de 300 reflexões consecutivas. Por este meio, a alteração no compri-

mento da trajetória causada pelas ondas gravitacionais poderia ser ampliada várias centenas de vezes e com esta técnica pode ser possível simular uma antena de ondas gravitacionais com nada menos que algumas centenas de quilômetros de comprimento. Sistemas deste tipo estão sendo desenvolvidos, entre outros, pelo Professor R. Drever e seu grupo, da Universidade de Glasgow.

Outras possibilidades abrangem a monitoração muito cuidadosa do movimento de sondas interplanetárias estudando o efeito Doppler dos sinais que transmitem e – encarando a coisa mais à frente – o rastreamento pelo laser entre uma dupla de espaçonaves amplamente separadàs pode proporcionar suficiente sensibilidade para captar mesmo as ondas gravitacionais fracas dos sistemas binários normais.

Se as ondas gravitacionais podem ser detectadas diretamente, todo um novo ramo da astronomia, provavelmente tão revolucionário quanto a radioastronomia ou astronomia dos raios X, surgiu agora. As ondas gravitacionais podem penetrar espessuras de matéria opaca a outras radiações, permitindo o estudo de fenômenos associados aos interiores das supernovas, aos buracos negros e aos núcleos galáticos, assim como – se a necessária sensibilidade puder ser obtida – de eventos associados à era da formação das galáxias; talvez os primeiros instantes da Grande Explosão possam vir à tona, permitindo-nos sentir o trovejar desse acontecimento e obter a informação relativa a um tempo muito anterior à liberação da radiação de microondas de fundo. No momento, devemos esperar o desenvolvimento da instrumentação necessária.

Se não podemos ainda detectar ondas gravitacionais diretamente, talvez possamos observar os efeitos colaterais de sua emissão. Exemplificando: em um sistema binário fechado a emissão de energia sob a forma de ondas gravitacionais levaria as estrelas a girarem em espiral lentamente. O pulsar PSR 1913 + 16, que foi detectado em 1974 por R. Hulse e J. Taylor usando o gigantesco refletor de rádio de Arecibo, mostrou-se um membro de um sistema binário com um período de 8 horas, possuindo o próprio pulsar um período de 0,059 segundos. A descoberta despertou grande interesse. Por um lado, a Relatividade Geral poderia ser utilizada para avaliar as propriedades do sistema – as massas combinadas dos corpos envolvidos foram estimadas em 2,83 massas solares com base no enorme (em comparação com Mercúrio) avanço do periélio de 4,22° por ano. Por outro lado, o sistema binário poderia ser utiliza-

do como um laboratório no qual testara a Relatividade Geral contra seus competidores.

O tipo de radiação gravitacional previsto pela Relatividade Geral é conhecido como radiação quadripolar e a alteração do período orbital que deve ser produzida por sua emissão foi calculada em torno de duas partes em 10^9 por ano. Outro tipo de radiação gravitacional – radiação dipolar – é prevista por algumas teorias competidoras e deveria levar a uma redução de período em torno de três partes em 10^7. Os resultados relatados por Taylor em 1978 indicam que o período está declinando em torno de 3,6 partes em 10^9 por ano, um número mais de acordo com a Relatividade Geral do que com vários dos seus competidores.

Estas observações representariam a detecção bem-sucedida dos efeitos da emissão de ação gravitacional e mais um triunfo da Relatividade Geral? É cedo demais para estar seguro disso, pois existem outras possíveis explicações do comportamento do binário pulsar. As ondas gravitacionais produzidas na estrela companheira afetariam significativamente o período e a evolução da órbita a menos que a segunda estrela também fosse um corpo compacto como uma estrela nêutron ou um buraco negro. As observações ópticas realizadas por P. Crane, J. E. Nelson, J. A. Tyson, no Observatório Nacional de Kitt Peak, indicam a presença de uma estrela muito pouco brilhante perto da posição do pulsar: se é companheira do pulsar, então é brilhante demais para ser uma anã branca (ou estrela nêutron ou buraco negro). Pode ser uma estrela de hélio – uma estrela que perdeu seu envoltório exterior de hidrogênio – sobre a qual ondas gravitacionais significativas se concentrariam, envolvendo completamente o fato até onde os efeitos da Relatividade estão em jogo.

Até o momento em que escrevíamos este livro o assunto não havia sido resolvido, mas o binário pulsar parece ser um fato tão promissor para os relativistas e seria uma tragédia se ele não se mostrasse um campo de testes adequado para a Relatividade Geral.

Gravidade hoje. . . e amanhã

A RELATIVIDADE GERAL ainda reina suprema. Entretanto, a teoria gravitacional está se deslocando rapidamente do terreno da pura física matemática para a árdua arena da experiência. Nos anos que estão por

vir podemos esperar cada vez mais precisão nos testes "clássicos" em termos de sistema solar – a dilatação do tempo e o desvio para o vermelho gravitacional, o avanço do periélio, a deflexão da luz e o retardo dos sinais. Com o pulsar binário, embora existam dúvidas a respeito de sua verdadeira natureza, há grandes esperanças de que o terreno dos testes da Relatividade Geral já se tenha deslocado para os sistemas estelares; e existe forte expectativa de que as ondas gravitacionais possam ser detectadas dentro em pouco, abrindo novos horizontes astronômicos permitindo a realização de testes cruciais quanto aos relativos méritos da Relatividade Geral e de suas competidoras.

Por um lado, sofisticadas experiências laboratoriais e no espaço estão sendo consideradas; por outro, uma descoberta tal como a inequívoca detecção de buracos negros faria muito para aumentar nossos conhecimentos da gravidade, do espaço, do tempo e do Universo. Os buracos negros primordiais que explodem representam o curinga do baralho: há considerável debate se eles existem ou não mas, se isto ocorre, e eles podem ser observados no ato de explodir, então terão de ser estabelecidos elos positivos entre a mecânica quântica e a gravitação, e as teorias da física das partículas estarão sujeitas a testes irrealizáveis em qualquer laboratório terrestre.

Sob o aspecto teórico, com a unificação das interações nuclear fraca e eletromagnética aparentemente realizada e diante das experiências que vêm sendo realizadas para testar a nova geração de grandes teorias unificadas, que tentam unificar as interações fraca, eletromagnética e forte, há uma atmosfera de otimismo de que não deve estar demasiado distante o dia em que todas as quatro forças da natureza estarão sob a mesma égide. Talvez a supergravidade venha a se mostrar a resposta – nada podemos dizer no momento. Nem podemos prever que efeitos uma nova teoria quântica da gravitação pode ter sobre nossa visão do Universo, sua origem e sua evolução ou sobre questões tão polêmicas quanto a natureza das singularidades dentro dos buracos negros.

O estudo da gravidade, dos buracos negros e do Universo tornou-se um tema central na marcha para diante do homem tentando compreender o mundo ao seu redor e as forças que modelam seu destino. Percorremos um longo caminho desde as idéias de Aristóteles, Galileu, Newton e do próprio Einstein. As décadas vindouras podem assistir a novas revoluções tão grandes como as que já modificaram nossa compreensão do cosmos.

Bibliografia

EMBORA EXISTA uma ampla variedade de livros escritos em diferentes níveis sob os vários aspectos do assunto central deste, devemos levar em conta que a gravitação, os buracos negros e a cosmologia são áreas de intensa atividade de pesquisa, e para manter-nos atualizados é necessário consultar os jornais e outras publicações. Os periódicos que contêm notícias recentes e artigos de divulgação científica são, entre outros, *New Scientist* (Reino Unido, semanal), *Scientific American* (EUA, mensal) e *Sky and Telescope* (EUA, mensal). Os jornais técnicos que também incluem notícias e artigos de divulgação abrangem: *Nature* (Reino Unido, semanal) e *Science* (EUA, semanal). Jornais técnicos especializados de relevância particular são: *Astronomy and Astrophysics, Astrophysical Journal, Comments on Astrophysics* (artigos muito interessantes) e *Journal of General Relativity and Gravitation*. Uma publicação anual muito útil é a *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, editada por G. Burbidge, D. Layzer e J. G. Phillips, Annual Reviews Inc., Califórnia.

Uma seleção pessoal de livros é fornecida abaixo. Muitos dos livros aqui relacionados apresentam um nível técnico significativamente mais elevado do que este livro. Com exceção dos trabalhos gerais e históricos, as publicações menos matemáticas e de nível mais popular receberam um asterisco.

Astronomia geral

Meadows, A. J.: *Stellar Evolution* (3ª ed.), Pergamon, Oxford, 1978.

Mitton, Simon (ed.): *The Cambridge Encyclopaedia of Astronomy*, Cape, Londres, 1977.

Nicolson, Iain: *Astronomy – A Dictionary of Space and the Universe*, Arrow, Londres, 1977.

Pasachoff, J. M., & Kutner, M. L.: *University Astronomy*, W. B. Saunders, Philadelphia, Londres, Toronto, 1978. Um texto moderno de longo alcance com muito pouco conteúdo matemático; uma versão mais curta, não matemática, é intitulada *Astronomy Now*.

Ronan, Colin (ed.): *Encyclopaedia of Astronomy*, Hamlyn, Londres, 1979.

História da força, gravitação e cosmologia

Berry, Arthur: *A Short History of Astronomy*, Dover, Nova York, 1961. É uma reimpressão de um trabalho publicado originalmente em 1898.

Cohen, I. Bernard: *The Birth of a New Physics*, Heinemann, Londres, 1961. Explicação concisa da emergência da mecânica newtoniana e da gravitação.

Grant, E.: *Physical Science in the Middle Ages*, Wiley, Nova York, Chichester, 1971.

Koyré, A.: *From the Closed World to the Infinite Universe*, Johns Hopkins Press, Baltimore, 1957.

Ronan, Colin: *Galileo*, Weidenfeld and Nicolson. Londres, 1974. Um relato muito agradável da vida, do trabalho e da época de Galileu.

Shea, W. R.: *Galileo's Intellectual Revolution*, Macmillan, Londres, 1972.

Westfall, R. S.: *Force in Newton's Physics*, Wiley, Nova York, Chichester, 1971.

Conceitos modernos de força e partículas

* Calder, Nigel: *The Key to the Universe*, British Broadcasting Corporation, Londres, 1977. Introdução excitante à moderna física da força.

* Davies, P. C. W.: *The Forces of Nature*, Cambridge University Press, Cambridge, 1979. Completo, embora não matemático.

Relatividade, gravitação, buracos negros e cosmologia

* Bergmann, P. G.: *The Riddle of Gravitation*, Murray, Londres, 1969. Embora ultrapassado em alguns aspectos, continua a ser uma clara e lúcida discussão do assunto.

Berry, M.: *Principles of Cosmology and Gravitation*, Cambridge University Press, Cambridge, 1976. Claro, conciso e de moderada dificuldade técnica.

* Einstein, Albert: *Relativity – The Special and the General Theory*, Methuen, Londres, 1920; brochura, 1960. Uma introdução concisa "diretamente da fonte".

Hawking, S. W., & Israel, W. (eds.): *General Relativity – An Einstein Centenary Survey*, Cambridge University Press, Cambridge, 1979. Uma extensa coleção de artigos modernos, muitos de alto nível de dificuldade, escritos por pesquisadores de vanguarda no campo. Não obstante, vários artigos são acessíveis a leitores não especialistas. Um volume notável.

Hazard, C. & Mitton, Simon: *Active Galactic Nuclei*, Cambridge University Press, Cambridge, 1979. Embora altamente técnico em certas partes, este livro abrange material acessível a não especialistas e proporciona uma fonte de referência útil em uma área de pesquisa em rápido desenvolvimento.

* Hoyle, Sir Fred: *Ten Faces of the Universe*, Freeman, San Francisco, 1977. Uma coleção de fascinantes e provocantes ensaios.

* John, L. (ed.): *Cosmology Now*, British Broadcasting Corporation, Londres, 1973. Uma coleção de artigos altamente interessantes baseada em uma série de programas.

* Kaufmann, W. J.: *The Cosmic Frontiers of General Relativity*, Little, Brown, Boston, 1977; Penguin, Londres, 1979. Uma explicação clara, interessante e copiosamente ilustrada da Relatividade e dos buracos negros. Dá particular atenção aos diagramas de espaço-tempo e ilustra o que poderia ser visto pelos observadores que penetrassem nos buracos negros.

Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A.: *Gravitation*, Freeman, San Francisco, 1974. Um notável texto em nível de pós-graduação.

* Narlikar, J. V.: *The Structure of the Universe*, Oxford University Press, Oxford, Londres, 1977. Interessante discussão dos aspectos da cosmologia, gravitação, tempo e astrofísica por um dos criadores da teoria de Hoyle-Narlikar.

Rindler, W.: *Essential Relativity* (edição revista), Van Nostrand Reinhold, Nova York, Wokingham, 1977. Uma das mais claras exposições semitécnicas das teorias Geral e Especial.

Sciama, D. W.: *Modern Cosmology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1971. Interessante e clara introdução à cosmologia e relevantes aspectos da astrofísica, só com um poquinho de matemática.

Wald, R. M.: *Space, Time and Gravity*, University of Chicago Press, Chicago, 1977. Trabalho conciso, baseado em 10 conferências.

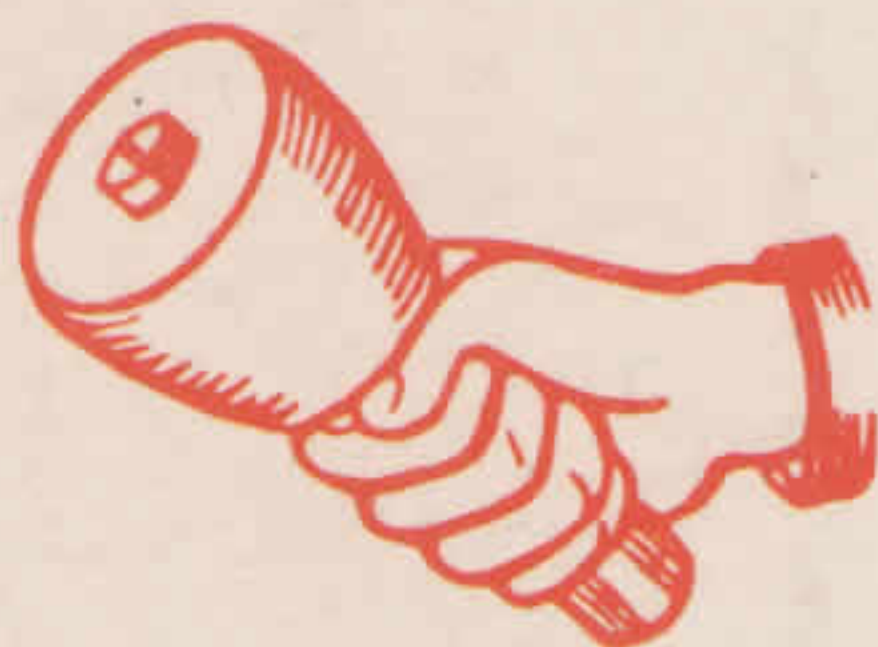
Weinberg, Steven: *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, Wiley, Nova York, Chichester, 1972. Avançado tratado geral.

* Weinberg, Steven: *The First Three Minutes*, Basic Books, New York, 1977; Deutsch, Londres, 1977. Discussão notavelmente lúcida e interessante da cosmologia da Grande Explosão.

Capa de Jader Marques Filho

Iain Nicolson BSc, FRAS, FBIS é bastante conhecido como educador e escritor sobre astronomia e ciência espacial. Ele também criou muitos programas de rádio e televisão a esse respeito. Seus interesses abrangem a evolução estelar, a matéria interestelar, os buracos negros, a vida no Universo, a exploração espacial e as viagens interestelares.

QUE É GRAVIDADE? Esta é uma pergunta que até o próprio Newton teve o cuidado de não tentar responder.

Todos nós estamos conscientes da presença da gravidade sobre a Terra; contudo, quando arrastamos nossos corpos pesados para fora da cama pela manhã, é difícil para nós nos darmos conta de que a gravitação é a mais fraca das quatro "forças fundamentais" que os físicos conhecem. Não obstante, embora possa ser fraca em escala microscópica, a gravidade é a força dominante quando se trata de grandes massas. É a gravidade que nos mantém sobre a superfície da Terra, que acorrenta a Lua em sua órbita ao redor da Terra, a Terra em sua órbita ao redor do Sol e o Sol em sua órbita ao redor do centro do nosso sistema estelar. A gravidade domina o comportamento do Universo como um todo e governará sua futura evolução.

Francisco Alves
qualidade há mais de um século